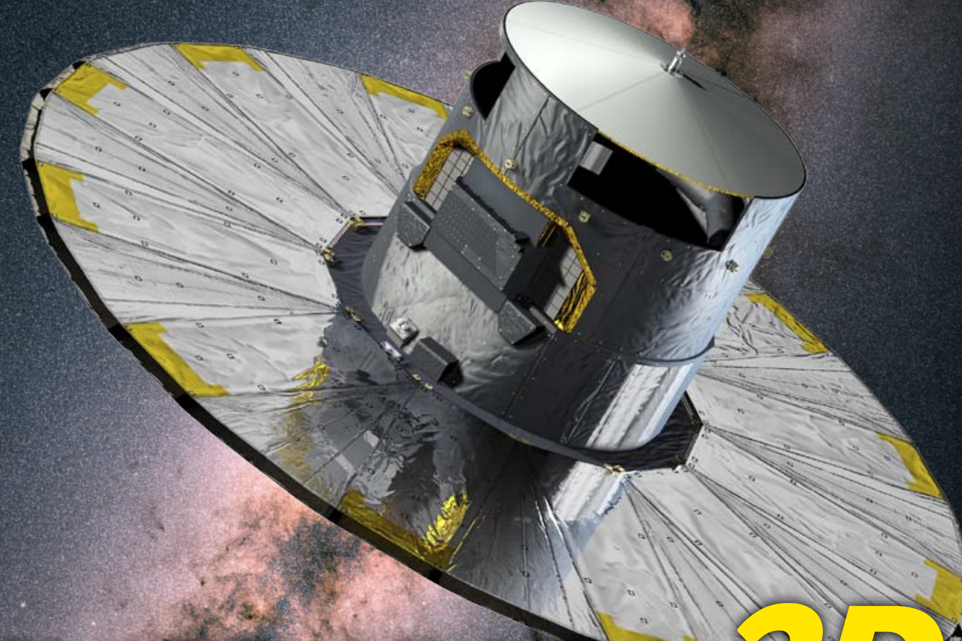
INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Marzo 2019 • N.º 510 • 6,90 € • investigacionyciencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



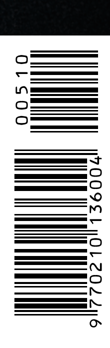
EL PRIMER MAPA 3D DE LA VÍA LÁCTEA

La misión Gaia desentierra el pasado de nuestro entorno cósmico

EVOLUCIÓN HUMANA
Actividad física: una necesidad fisiológica

CAMBIO CLIMÁTICO
¿Puede la captura de carbono frenar el calentamiento?

NEUROCIENCIA
Ya es posible obtener neuroimágenes de animales en movimiento



INVESTIGACIÓN Y
CIENCIA
Marzo 2019, Número 510



LIZ TORMES

ARTÍCULOS

ASTRONOMÍA

22 **El primer mapa 3D de la Vía Láctea**
La misión Gaia, de la ESA, ha cartografiado con una precisión sin precedentes 1300 millones de estrellas de la galaxia. Sus resultados están cambiando la forma de ver y entender nuestro entorno cósmico.
Por Carme Jordi y Eduard Masana

BIOLOGÍA EVOLUTIVA

32 **Actividad física: una necesidad fisiológica**
A diferencia de nuestros parientes simios, los humanos necesitamos realizar ejercicio para estar sanos.
Por Herman Pontzer

CONSERVACIÓN

40 **¿Es posible salvar los corales?**
Los científicos cultivan, trasplantan y mejoran genéticamente los corales contrarreloj con el fin de acelerar su adaptación a un océano cada vez más cálido, pero el reto de reconstruir arrecifes enteros resulta abrumador.
Por Rebecca Albright

NEUROCIENCIA

56 **Observar las neuronas de animales en movimiento**
Los miniscopios, diminutos microscopios de fluorescencia que se colocan en la cabeza de los animales, ofrecen una imagen clara de su actividad neuronal mientras exploran e interaccionan con el entorno. La técnica ha sido declarada método del año 2018 para la investigación biológica. *Por Michael Eisenstein*

SOSTENIBILIDAD

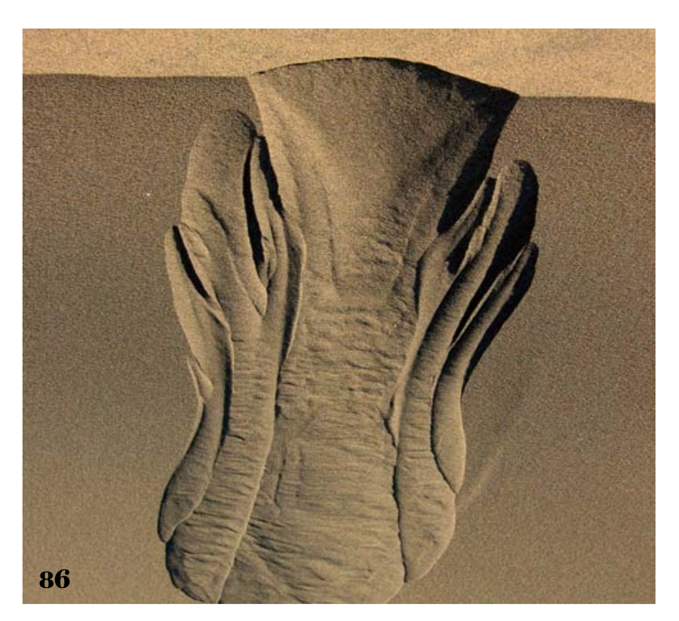
62 **El último recurso**
¿Es posible frenar o incluso invertir el cambio climático retirando CO_2 de la atmósfera? *Por Richard Conniff*

COSMOLOGÍA

70 **El problema de la constante de Hubble**
Los físicos llevan años sin ponerse de acuerdo sobre la velocidad a la que se expande el universo. ¿Apunta esta controversia a la existencia de nuevas leyes de la naturaleza? *Por Dominik J. Schwarz*



48



INVESTIGACIÓN Y
CIENCIA

SECCIONES

3 Cartas de los lectores

6 Apuntes
Planeta febril. India sufre una crisis de suicidios femeninos. Materia oscura microbiana. Polvo de supernovas. Haces de ultrasonidos directos al cerebro. Adiós a los 37,0 °C. Los ojos del pelotón.

13 Agenda

14 Panorama
Óptica cuántica sin fotones. *Por Alejandro González Tudela y J. Ignacio Cirac*
Cuando la primera línea de defensa fracasa. *Por Elizabeth Svoboda*
Transformar el sistema alimentario global. *Por Günther Fischer*

48 De cerca
La longevidad de las sabinas. *Por Jesús Julio Camarero y Miguel Ortega Martínez*

50 Filosofía de la ciencia
Popper y Kuhn sobre el progreso científico. *Por Julio Ostalé*

54 Foro científico
Capturemos el carbono. *Por M. Freeman y D. Yellen*

55 Ciencia y gastronomía
Helados. *Por Pere Castells*

80 Correspondencias
Volta, Ørsted y Ampère. *Por José Manuel Sánchez Ron*

86 Curiosidades de la física
Dunas musicales. *Por H. Joachim Schlichting*

89 Juegos matemáticos
La gramática del crecimiento multicelular. *Por Bartolo Luque*

92 Libros
La ubicuidad de *Drosophila melanogaster*. *Por L. Alonso*
Nuestra especie vista desde fuera. *Por N. Bueno Guerra*
Steven Weinberg: de lo cósmico a lo humano. *Por Miguel Á. Vázquez-Mozo*

96 Hace...
50, 100 y 150 años.

EN PORTADA



La misión europea Gaia ha cartografiado con un detalle sin precedentes las posiciones, movimientos y propiedades de más de 1300 millones de estrellas de la Vía Láctea. La cantidad y la precisión de los datos, sin parangón en la historia de la astronomía, están reescribiendo la historia de la galaxia y buena parte de lo que creíamos saber sobre los procesos de evolución estelar. Imágenes de ESA/Consorcio Gaia, adaptadas por *Investigación y Ciencia*.



Octubre 2018

LAS LEYES DE LYELL Y LA GEOLOGÍA ACTUAL

En el artículo «Las leyes de Lyell, a examen» [Investigación y Ciencia, octubre de 2018] Michael Rampino pone en cuestión las leyes de Lyell basándose en una serie de observaciones geológicas y astronómicas. Analiza las razones que llevaron a Lyell a presentar sus leyes, y cómo estas dejaron arrinconadas otras tendencias bien documentadas del siglo xix. Hasta ahí todo bien. Pero a partir de aquí se presenta la geología actual anclada en el gradualismo y a los geólogos como estudiosos de la Tierra que experimentan en ello «una especie de espiritualidad», «cegados por el hecho que la Tierra es nuestro hogar» y por tanto necesariamente sesgados.

Siento discrepar. Fui educado en el más puro catastrofismo. Recuerdo vívidamente cómo, ya en 1988-89, durante mi formación en la universidad de Granada, nos explicaban que las catástrofes eran el motor de los cambios en la faz de la Tierra. Es decir, que el trabajo de Luis y Walter Álvarez de 1980 acerca de la extinción cretácica ya había calado en una universidad relativamente periférica tan solo nueve años después.

Por otra parte, Rampino incluye en su artículo un mapa donde sitúa nueve lugares de impacto de asteroides relacionados con las extinciones más recientes, todos ellos en la corteza continental. No puedo creer que no haya considerado que es estadísticamente improbable que ningún impacto haya ocurrido en la corteza oceánica, la cual ocupa más del 70 por ciento de la superficie del planeta. Hoy, muchos geólogos puede que no recuerden exactamente las leyes de Lyell, pero sí que podrían discutir su mapa de impactos de asteroides.

Mario Sánchez Gómez
Profesor titular
Departamento de Geología
Universidad de Jaén

Rampino presenta una sorprendente interpretación de la obra de Charles Lyell y de la historia de la geología. Para Rampino, esta ciencia estaría basada en un «dogma» compuesto por tres «leyes» formuladas por Lyell.

Es necesario aclarar que no existen las tres leyes de Lyell: son una formulación del propio Rampino. La aportación de Lyell expuesta en su obra *Principios de geología* es un entramado de varias ideas que se han englobado en el concepto de uniformitarismo. Tomadas en conjunto, estas ideas han generado confusión a lo largo de la historia de la geología, una confusión que en mi opinión persiste en el artículo de Rampino.

Lyell propone un método para la geología basado en la constancia de las leyes físicas —un postulado que resulta común a todas las ciencias— y en la aplicación de causas reales y observables para la explicación de los fenómenos geológicos. Estos aspectos metodológicos siguen vigentes, y ya en la época de Lyell eran ampliamente aceptados y aplicados por la comunidad científica.

Es cierto que Lyell, siguiendo ideas de James Hutton, consideraba la Tierra como un sistema en equilibrio con cambios siempre lentos y uniformes, sin direccionalidad y sometido a procesos cíclicos. Así, por ejemplo, Lyell suponía que las faunas fósiles podrían reaparecer en un futuro, como cuando escribió: «Entonces podrían volver aquellos géneros de animales cuya memoria se preserva en las rocas antiguas de nuestros continentes. El pterodáctilo bien podría volver a volar en el aire». Pero si bien la aportación metodológica de Lyell continúa plenamente vigente, sus ideas sobre la uniformidad del cambio geológico y el carácter cíclico de la historia de la Tierra fueron ya cuestionadas en su tiempo. De hecho, el propio Lyell se las replanteó al final de su vida, en la décima edición de su obra, al admitir la teoría de la evolución de Darwin.

En geología, tal como indica el autor, ha persistido una preferencia por usar cambios de tipo gradual. Dicha preferencia ha sido usada por algunos geólogos de forma dogmática para negar hipótesis que implicaban cambios bruscos o catastróficos. Pero ese extremo está ampliamente superado hoy: la geología moderna es una mezcla donde coexisten el uniformitarismo y el catastrofismo, con procesos graduales y catastróficos, y también procesos cíclicos y lineales. Y la afirmación —que no «ley»— de Lyell de que las causas actuantes son siempre terrestres también se encuentra hoy ampliamente superada. La geología actual incluye procesos terrestres y otros relacionados con los movimientos astronómicos, como las glaciaciones y los impactos de meteoritos.

> **«La geología moderna es una mezcla de uniformitarismo y catastrofismo, con procesos graduales y catastróficos, y también procesos cíclicos y lineales»**

Sin lugar a dudas, las influencias astronómicas enriquecen la geología, y el autor aporta una hipótesis novedosa y muy atractiva al respecto. Pero, para dar relevancia a su teoría, Rampino expone una visión anacrónica, dogmática e incluso espiritual de la geología actual que no es aceptable. Curiosamente, la estrategia de reescribir la historia de la geología para dar relevancia a una aportación personal la usó en su tiempo Lyell. Rampino parece seguir aquí una estrategia similar.

Jordi Pujadas Ferrer
Geólogo consultor
Montblanc, Tarragona

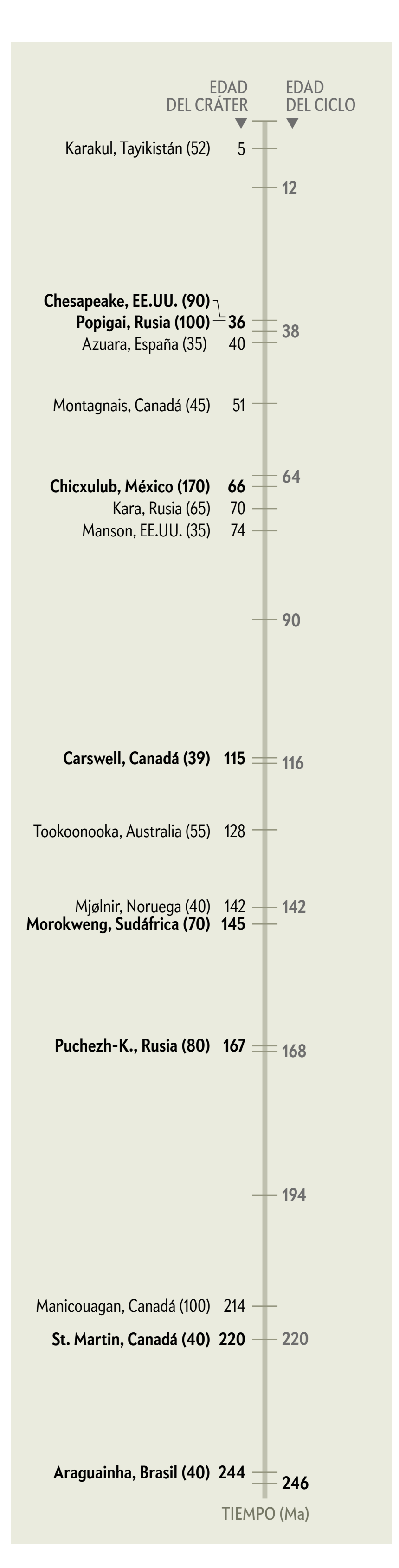
Rampino argumenta a favor de la existencia de ciclos recurrentes de impactos extraterrestres que ocurrirían cada 26 o 30 millones de años y que guardarían una estrecha relación con el movimiento del sistema solar a través de la galaxia. Para ello, presenta una tabla donde compara la edad de los principales impactos con lo que cabría esperar a partir de los ciclos postulados.

Sin embargo, su lista parece adolecer de sesgos de selección, toda vez que los impactos referidos no son los principales registrados durante los últimos 250 millones de años. Una lista de impactos que han generado cráteres de al menos 30 kilómetros de diámetro en ese tiempo parece contradecir los ciclos propuestos por el autor. La relación completa se aporta a continuación [*véase la gráfica adjunta*].

Ricardo de la Peña
Ciudad de México

Responde Rampino: *Sobre el comentario de Sánchez Gómez, creo que, a pesar de la reciente consideración hacia las catástrofes, todavía existe un fuerte sesgo en las ciencias geológicas, especialmente en paleontología, a favor del cambio gradual y los procesos terrestres en detrimento de los cambios abruptos y las causas extraterrestres. Tan recientemente como en 2010, 29 conocidos paleontólogos escribieron una carta en respuesta a un artículo sobre el impacto de Chicxulub en la que cuestionaban la conexión causal entre dicho impacto y la extinción masiva de finales del Cretácico, así como la importancia general de los impactos en la historia de la vida. Argumentaban que los cambios en el nivel del mar (un proceso gradual) podrían ser el denominador común de las cinco principales extinciones masivas de los últimos 540 millones de años. Para explicar la extinción de los dinosaurios, proponían un escenario de extinción gradual y multicausal que se habría prolongado durante millones de años. Por tanto, aún parece haber una renuencia a considerar la importancia de las catástrofes en geología.*

Los grandes impactos oceánicos, que por supuesto se han producido aunque no se conocen, pueden no ser tan efectivos a la hora de desencadenar extinciones masivas, ya que la cobertura de sedimentos del océano profundo es exigua. Un impacto oceánico no produciría hollín ni aerosoles de ácido sulfúrico, los cuales parecen ser importantes para provocar la oscuridad y las bajas temperaturas que suelen considerarse la causa principal de las extinciones relacionadas con impactos.



En paréntesis, diámetro de los cráteres (en kilómetros). En negrita, impactos incluidos en la tabla de la página 67 del artículo de Rampino. (Ma = millones de años)

A Pujadas Ferrer: Estoy de acuerdo en que las explicaciones catastrofistas de los eventos geológicos se hallan en aumento. Con todo, hoy en día sigue siendo posible que un destacado paleontólogo escriba un libro sobre evolución y no haga ni una sola mención a las extinciones masivas, ni, desde luego, a posibles causas extraterrestres o a otros eventos catastróficos. Otro reconocido paleontólogo afirmó hace poco que las extinciones masivas se producen cuando concurren a la vez varias manifestaciones excepcionalmente intensas de los mismos procesos que operan durante las extinciones normales (como las fluctuaciones en el nivel del mar, los cambios en el clima o el vulcanismo): una explicación multicausal que conserva una estricta perspectiva uniformista. Si bien este puede ser el caso en algunas ocasiones, los impactos catastróficos y las grandes erupciones volcánicas representan eventos singulares no predichos por las teorías de cambio ambiental paulatino.

A De la Peña: En mi artículo sugería que algunos impactos podrían estar llegando a intervalos de 26 millones de años y enumeraba cráteres conocidos que parecen seguir dicho ciclo. Los análisis detallados de la edad de los cráteres apoyan la existencia de pulsos cíclicos caracterizados por un mayor número de impactos de asteroides o cometas, y tres de los cuatro mayores cráteres de los últimos 250 millones de años (Popigai, Chicxulub y Morokweng) han tenido lugar durante las agrupaciones de cráteres propuestas.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:

PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



LAS OLAS DE CALOR pertinaces y mortíferas, que ponen en riesgo a millones de personas, son cada vez más frecuentes.

MATTEO COLOMBO/GETTY IMAGES

CLIMA Y SALUD

Planeta febril

Un funesto informe vincula el cambio climático con pérdidas laborales, enfermedades y muertes prematuras en todo el mundo

Una devastadora ola de calor asoló Europa durante 2003, donde se cobró decenas de miles de vidas, calculan los expertos. Muchos eran ancianos, personas con movilidad reducida o enfermos crónicos. Ahora, el cambio climático está convirtiendo esos fenómenos meteorológicos en algo más habitual, con efectos que no solo aquejan a los ancianos y a los enfermos. Las temperaturas calurosas, además de suponer una amenaza directa para nuestra vida, también causan la pérdida de miles de millones de horas de trabajo, favorecen la propagación de enfermedades infecciosas y merman las cosechas, según un informe reciente.

Publicado el pasado diciembre en *Lancet*, el trabajo describe los últimos hallazgos del Lancet Countdown, una coalición internacional de organizaciones científicas que colaboran con la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización Meteorológica Mundial. El grupo examina el impacto que el cambio climático supone para la salud y las respuestas de los Gobiernos.

«Afecta a toda la humanidad, a cada persona, a cada población. Ningún país es inmune a las consecuencias del cambio climático sobre la salud», advierte Nick Watts, director ejecutivo de Lancet Countdown y uno de los numerosos autores del informe.

El informe revela que millones de personas en todo el mundo son vulnerables a las enfermedades y los fallecimientos propiciados por el calor. Las poblaciones de Europa y del Mediterráneo oriental resultan especial-

mente sensibles, quizá porque cuentan con un alto porcentaje de personas de edad avanzada residentes en zonas urbanas. Los mayores de 65 años constituyen un colectivo de especial riesgo, al igual que los afectados por dolencias crónicas, como cardiopatías o diabetes. Las zonas habitadas experimentan una variación de la temperatura media que duplica ampliamente la variación mundial, con 0,8 frente a 0,3 grados centígrados, respectivamente (*gráfica*). En 2017 hubo 157 millones de «episodios de exposición a olas de calor» (entendidos como una ola de calor que afecta a una persona) más que en 2000. En comparación con el período de 1986 a 2005, en el de 2000 a 2017 cada persona ha estado expuesta en promedio a 1,4 días más de olas de calor cada año. Quizá no parezca mucho, pero Watts matiza: «Una persona de 75 años aquejada de una enfermedad renal probablemente sobrevivirá a tres o cuatro días de calor sofocante, pero no a cinco o seis».

Las temperaturas tórridas también afectan a la producción de alimentos. En 2017, el calor excesivo acarreó la pérdida de nada menos que 153.000 millones de horas de trabajo, el 80 por ciento de ellas en la agricultura, según indica el informe; las regiones más vulnerables se concentran en India, sudeste asiático, África subsahariana y Sudamérica. La primera fase del efecto del calor es la incomodidad, explica Tord Kjellstrom, director de la consultoría Health and Environment International Trust en Nueva Zelanda, asesor de salud ambiental y laboral y, a la sazón, uno de los autores del informe. Pero llega un momento en que el calor excesivo altera las funciones corporales. Por ejemplo, sudar con profusión sin reponer el agua acaba provocando nefropatía crónica, destaca Kjellstrom. Así lo demuestran informes recientes que atribuyen el fallecimiento de peones agrícolas en Centroamérica a los problemas renales contraídos por años de trabajo en el campo bajo un calor inclemente. Los países más ricos, como EE.UU., eluden los peores efectos gracias al acceso al agua corriente y, en el caso del trabajo en interiores, al aire acondicionado. Pero esas soluciones resultan caras, aclara Kjellstrom.

Y a todo ello se añaden los daños indirectos. Las temperaturas cálidas han ampliado las áreas de distribución geográfica de los organismos responsables de la propagación del dengue, el paludismo o el cólera. La «capacidad vectorial», parámetro que cuantifica la facilidad con la que el portador de un patógeno lo transmite, ha alcanzado cifras de récord en 2016 en el virus del dengue, cuyos transmisores (o vectores) son los mosquitos *Aedes aegypti* y *Aedes albopictus*. Entre los años 80 y la década actual, la superficie de la zona litoral adecuada para las bacterias del género *Vibrio* (al cual pertenece la causante del cólera) ha aumentado un 24 por ciento en la cuenca del Báltico, mientras que en el noreste de EE.UU. lo ha hecho un 27 por ciento. En las altiplanicies de África, el ambiente propicio para el parásito causante del paludismo (*Plasmodium falciparum*) se ha extendido casi un 21 por ciento desde los años 50 del pasado siglo hasta la actualidad.

El cambio climático amenaza asimismo a la seguridad alimentaria. El planeta aún produce suficientes alimentos para sustentar sobradamente a la humanidad, pero 30 países ya han sufrido descensos en las cosechas como resultado de la meteorología adversa, avisa el informe.

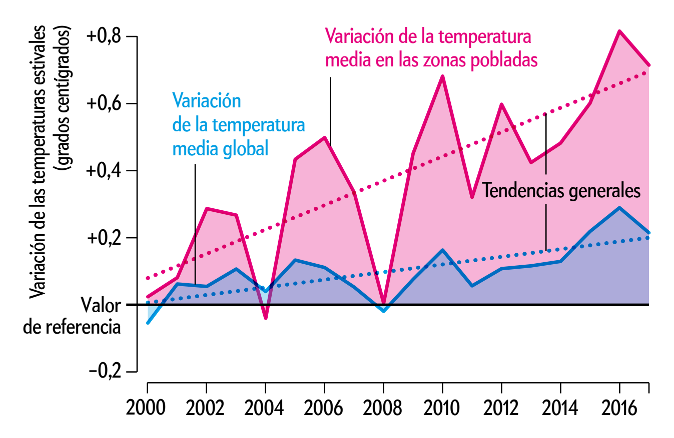
«En conjunto, el trabajo suscita una honda preocupación por la evolución que está tomando el cambio climático y sus posibles repercusiones para la salud humana», asevera Andy Haines, profesor de cambio ambiental y salud pública en la Escuela de Higiene y Medicina Tropical de Londres, que no ha participado en el informe de 2018 pero sí ha contribuido en anteriores evaluaciones de Lancet Countdown. «Uno de los problemas es que no disponemos de suficientes datos sobre los impactos actuales, en especial de los países de renta baja», probablemente los más afectados.

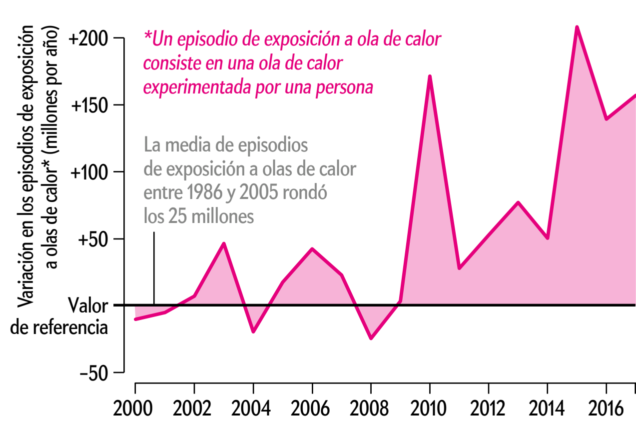
Pese a todo, el informe ofrece algún rayo de esperanza: en 2015, treinta de los cuarenta países inquiridos por la OMS afirmaron contar con planes sanitarios para la adaptación al cambio climático, y el 65 por ciento de las ciudades han emprendido (o están emprendiendo) evaluaciones del riesgo que este entraña para las redes sanitarias públicas. Pero el gasto mundial en adaptación sanitaria no alcanza todavía el 5 por ciento del total invertido en la adaptación al clima. Y los fondos aportados no han ido parejos a los compromisos adquiridos en la Cumbre de París, el acuerdo mundial sobre el clima que debería entrar en vigor en 2020.

Entre las principales medidas que los países deben adoptar para paliar los efectos sobre la salud destacan el abandono progresivo del carbón como fuente generadora de electricidad y la transición a medios de transporte más ecológicos, afirma Watts. Los vehículos eléctricos comienzan a abrirse paso en algunos lugares, subraya, y el transporte «activo», como caminar o ir en bicicleta, también es importante. A la hora de valorar los costes del cambio climático, queda claro que «de nuestra actitud activa o pasiva va a depender la salud de la humanidad durante el próximo siglo».

—*Tanya Lewis*

Un planeta más cálido pone en riesgo a más personas





En las gráficas se comparan las temperaturas y las olas de calor desde 2000 con los valores de referencia del período 1986-2005.

FUENTE: «THE 2018 REPORT OF THE LANCET COUNTDOWN ON HEALTH AND CLIMATE CHANGE: SHAPING THE HEALTH OF NATIONS FOR CENTURIES TO COME», NICK WATTS ET AL., EN *LANCET*, VOL. 392, 8 DE DICIEMBRE DE 2018; AMANDA MONTAÑEZ (*gráficas*)

SALUD PÚBLICA

India sufre una crisis de suicidios femeninos

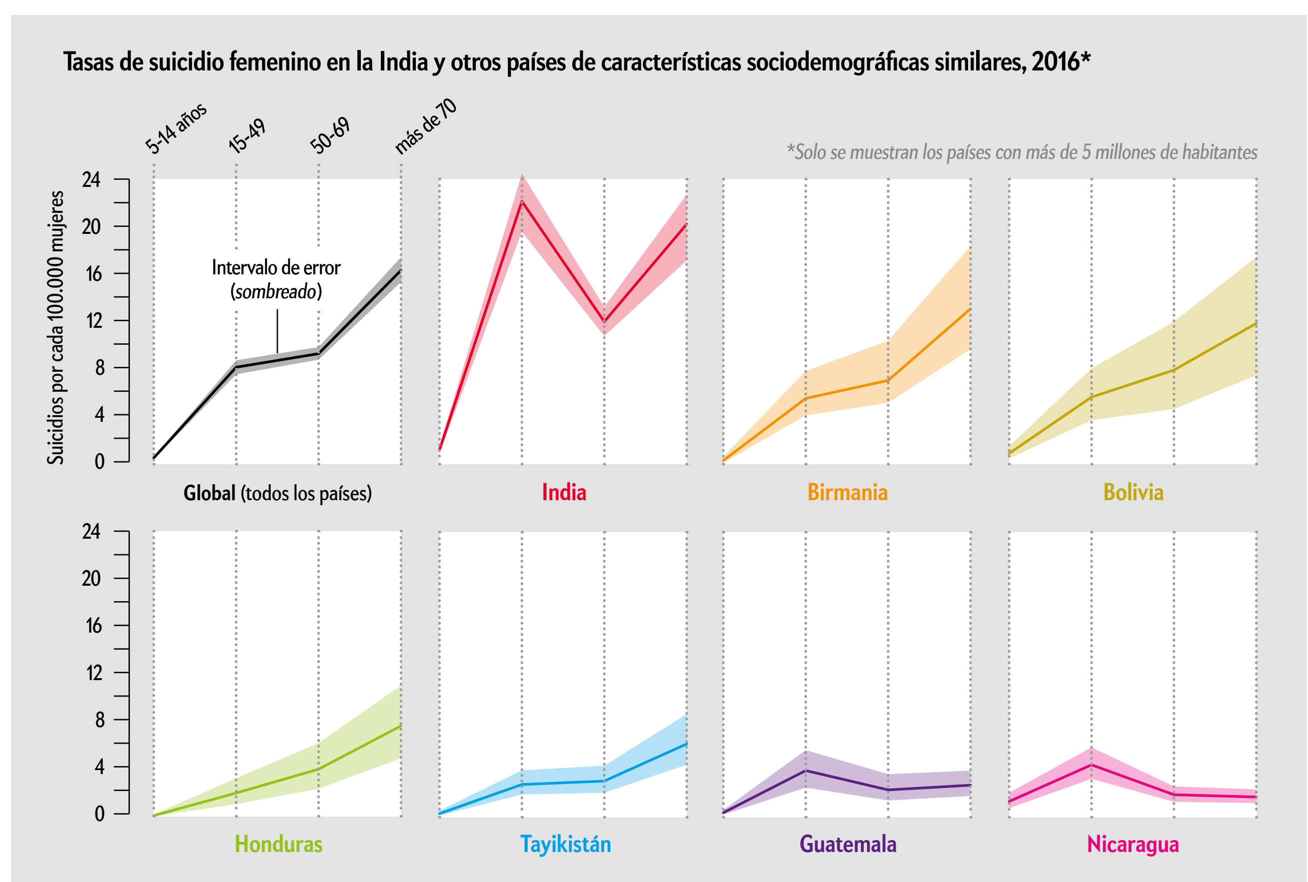
El fenómeno podría deberse al conflicto entre las aspiraciones de las mujeres y su aceptación social

Las mujeres indias se están suicidando a un ritmo alarmante. Una investigación publicada en octubre en *Lancet Public Health* reveló que, en 2016, más del 36 por ciento de los suicidios femeninos ocurridos en todo el mundo tuvieron lugar en la India, a pesar de que este país posee menos del 18 por ciento de la población femenina mundial. El suicidio es la principal causa de mortalidad en mujeres indias de entre 15 y 29 años, siendo responsable de entre 26 y 33 muertes por cada 100.000 mujeres en esa franja de edad. Según Global Health Data Exchange, una base de datos sobre demografía y salud global, la India sufre la tasa más elevada de suicidios entre mujeres jóvenes y de mediana edad de todos los países con características sociodemográficas similares.

Según Rakhi Dandona, autora del estudio y profesora de salud global en la Fundación de Salud Pública de la India y en la Universidad de Washington, la situación podría estar relacionada con un conflicto entre las aspiraciones de las mujeres y la rigidez de su entorno social. A medida que la India se ha desarrollado, las mujeres han tenido acceso a una mejor educación, han ganado autonomía y ha disminuido el número de matrimonios concertados. Sin embargo, en muchos aspectos, aún tienen un estatus social más bajo y menos oportunidades. Dandona y otros expertos sospechan que ese desajuste podría hacer que algunas pierdan la esperanza. Las tasas de suicidio resultan especialmente elevadas en el sur del país, donde el desarrollo y los avances sociales han experimentado rápidas mejoras. En cambio, en los estados más rurales y tradicionales del norte, las cifras podrían ser menores debido a que, en ellos, tal vez las mujeres «no sean tan conscientes de que podrían vivir una vida mejor», añade la experta.

«El número de muertes por suicidio guarda también relación con el método usado [para suicidarse]», apunta Vikram Patel, profesor de salud global de Harvard que no participó en el estudio. En Occidente, las mujeres intentan quitarse la vida más a menudo que los hombres, pero estos suelen usar métodos más letales, lo que se traduce en más muertes. Pero en la India, según Patel, las mujeres tienden a usar métodos tan mortíferos como los de los varones.

—*Dana G. Smith*



LAS TASAS DE SUICIDIO de un país suelen correlacionarse con su índice sociodemográfico (ISD), una medida de desarrollo basada en los ingresos medios, el nivel educativo y la tasa de fertilidad. Un trabajo reciente ha hallado que, en la India, las mujeres se suicidan tres veces más de lo que cabría esperar a partir de su ISD. Además, las mujeres indias que más mueren por esta causa son las que cuentan entre 15 y 49 años, cuando lo habitual es que el número de suicidios aumente con la edad. Estas gráficas comparan las tasas de suicidio por grupos de edad en naciones cuyo ISD se diferencia en menos de 0,03 puntos del de la India. Para evitar anomalías estadísticas, se excluyen países con menos de 5 millones de habitantes.

FUENTE: GLOBAL HEALTH DATA EXCHANGE

BIOLOGÍA

Materia oscura microbiana

La gran mayoría de los microorganismos no han sido estudiados nunca en el laboratorio

Al igual que la mayor parte de la materia existente en el universo es «materia oscura», de propiedades ignotas, buena parte de nuestro planeta estaría poblado por microorganismos desconocidos: seres que sabemos que existen pero que nunca han sido cultivados en el laboratorio. Ahora, un estudio publicado en *mSystems* ha hallado que estas formas de vida podrían dar cuenta de hasta el 81 por ciento de los géneros bacterianos que viven fuera de nuestro cuerpo. Tales organismos podrían esconder la llave de nuevos fármacos o ayudarnos a entender la vida en ambientes extremos, como los existentes en otros planetas.

Los microorganismos constituyen la forma de vida más abundante de la Tierra. Hasta ahora se ha secuenciado el ADN de numerosas especies sobre el terreno. Sin embargo, estas pueden ser difíciles de analizar en el laboratorio, algo que además suele exigir hacerlo de una en una a fin de estudiarlas en un entorno controlado. Para estimar su número, Karen Lloyd, microbióloga de la Universidad de Tennessee en Knoxville, y sus colaboradores compararon las secuencias de ADN microbiano conocidas con el conjunto de especies que ya han sido cultivadas. A partir de ahí, dedujeron qué fracción de microorganismos habrían sido secuenciados pero nunca cultivados (*gráfica*). «Estamos descubriendo numéricamente que la mayoría de los microbios terrestres son seres sobre los que no hemos aprendido nada», apunta la investigadora.

El ingente número de especies —posiblemente cerca de un billón (10^{12})— implica que los científicos nunca podrán recolectarlas todas. Muchas habitan en lugares recónditos, como los abismos oceánicos o bajo los suelos helados del Ártico. Además, no todas pueden sobrevivir en un cultivo diseñado para criar una sola cepa, ya que algunas solo logran crecer en ambientes naturales mucho más complejos, explica Laura Hug, microbióloga ambiental de la Universidad de Waterloo que no ha participado en el estudio. «Obtienen lo que necesitan de su comunidad, por lo que no es posible cultivarlas aisladas», añade.

Con todo, Lloyd es optimista: «Hemos logrado grandes avances con los microorganismos conocidos y posiblemente haya aún más hallazgos esperándonos entre ellos [los que están sin estudiar]. Eso deja la puerta abierta a todo tipo de descubrimientos notables».

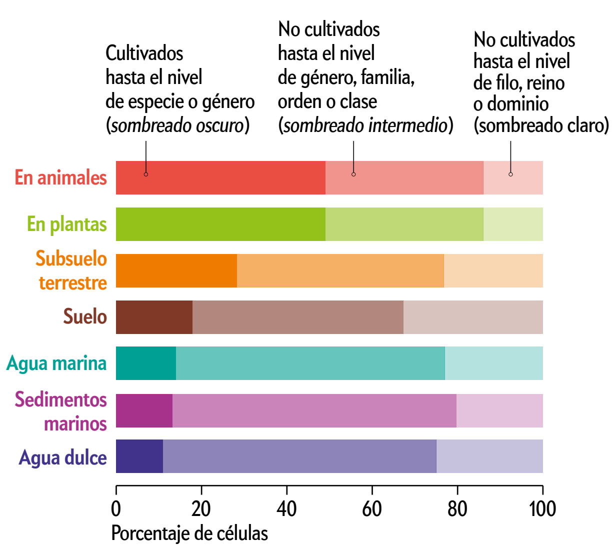
—*Dana Najjar*

Jerarquía taxonómica

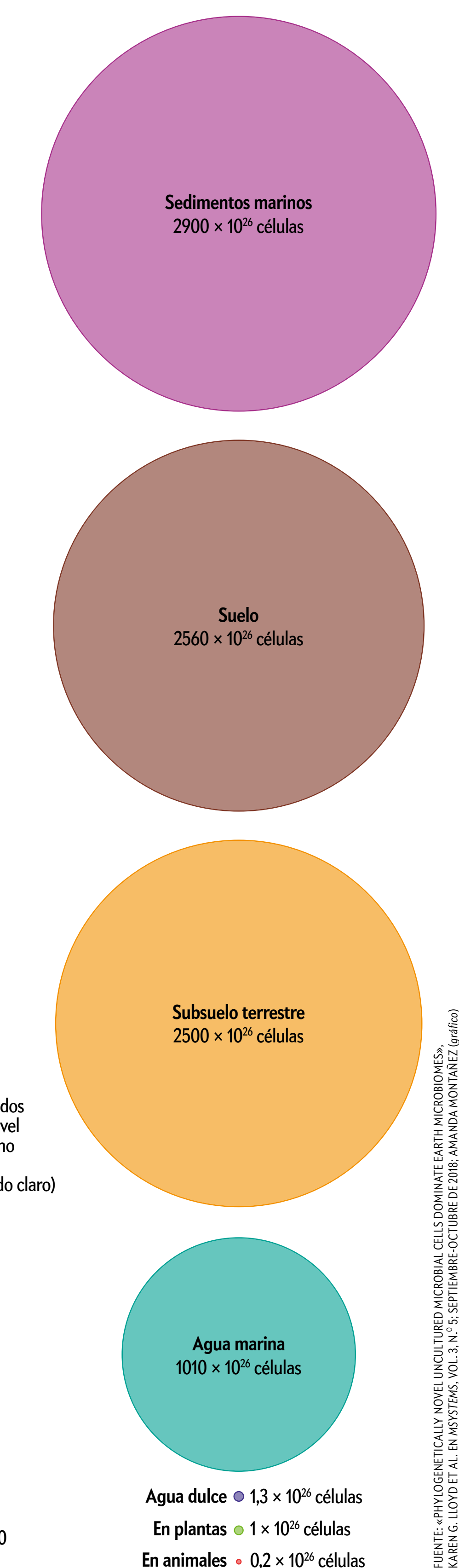
Especie · Género · Familia · Orden · Clase · Filo · Reino · Dominio

Inferior (más específica) ⟷ Superior (más general)

Los científicos han descrito con precisión (hasta al menos el nivel de género) cerca de la mitad de los microorganismos que habitan en plantas y animales. Sin embargo, las poblaciones que viven en otros entornos, comparativamente mucho mayores, siguen siendo grandes desconocidas. Por ejemplo, la clasificación en filos o niveles superiores de un tercio de los microorganismos que habitan en el suelo continúa envuelta en misterio.



Abundancia de células microbianas según el entorno



FUENTE: «PHYLOGENETICALLY NOVEL UNCULTURED MICROBIAL CELLS DOMINATE EARTH MICROBIOMES», KAREN G. LLOYD ET AL. EN *MSYSTEMS*, VOL. 3, N.º 5; SEPTIEMBRE-OCTUBRE DE 2018; AMANDA MONTAÑEZ (*gráfico*)



EL REMANENTE de supernova G54.1+0.3.

ASTROFÍSICA

Polvo de supernovas

La sílice, un compuesto común en la Tierra, podría haberse originado en violentas explosiones estelares

Hace tiempo que los astrónomos sostienen que la frase «somos polvo de estrellas» es mucho más que una expresión lírica. Ahora, un nuevo hallazgo ha añadido un verso a esta poesía cósmica.

Se ha detectado polvo de sílice (un compuesto muy común en la corteza terrestre, las playas, el hormigón y hasta los teléfonos móviles) en los restos de dos supernovas de la Vía Láctea. Las observaciones, descritas el pasado mes de octubre en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, ofrecen el primer indicio directo de que la sílice podría formarse en explosiones estelares.

«Se trata de un gran resultado, ya que algo tan común en la Tierra se habría creado en las explosiones más violentas del universo», indica Haley Gómez, astrónoma de la Universidad de Cardiff y coautora del estudio. «Es la historia de un origen.»

Los astrónomos llevan largo tiempo preguntándose por la génesis del polvo cósmico, ya se encuentre formado por sílice, carbono o hierro. Hasta hace poco, pensaban que se creaba cuando las estrellas parecidas al Sol llegaban a su vejez y expelían potentes vientos, cuyo gas se condensaba después en granos de polvo. Sin embargo, cuando detectaron polvo en galaxias tan lejanas que solo pudieron haberse formado poco después de la gran explosión —mucho antes de que las estrellas similares al Sol hubieran tenido tiempo de evolucionar— concluyeron que tenía que haber otra fuente.

Aunque comenzaron a sospechar que ese polvo debió formarse en explosiones de supernova, no ha sido hasta hace poco que han detectado algunos remanentes de supernovas cercanas con polvo en su seno. Mikako Matsuura, astrónoma también de Cardiff pero que no participó en el nuevo estudio, dice estar emocionada ante esas pruebas adicionales.

Si las supernovas del cosmos primitivo también crearon sílice, los primeros planetas del universo bien pudieron haberse parecido a nuestro pequeño punto azul pálido. «Es realmente interesante saber que pudo haber planetas similares a la Tierra tan pronto», concluye Gómez. «No es necesario esperar 13.000 millones de años.»

—Shannon Hall

NANOMEDICINA

Haces de ultrasonidos directos al cerebro

Una nueva técnica consigue liberar fármacos en zonas específicas del encéfalo

Los neurocientíficos no disponen de demasiadas herramientas para explorar el cerebro y tratar sus dolencias. La cirugía o la inserción de electrodos son excesivamente agresivas en la mayoría de los casos; y las técnicas no invasivas, como la estimulación magnética, resultan imprecisas. Ahora, el neurorradiólogo de Stanford Raag Airan y sus colaboradores han ideado un método que tal vez permita manipular de forma no invasiva regiones cerebrales pequeñas y muy localizadas. Sus resultados se han publicado en *Neuron*.

La idea se basa en una técnica que Airan ha estado desarrollando desde hace años pero que solo ahora ha comenzado a funcionar con la precisión suficiente. Primero, los investigadores inyectan en sangre cápsulas nanométricas cuyo interior alberga la molécula del fármaco. Después, apuntan al cerebro con un haz de ultrasonidos muy focalizado que abre la cápsula y libera el medicamento en la zona deseada. El fármaco cruza entonces la barrera hematoencefálica (la membrana que rodea al encéfalo y que solo deja pasar moléculas diminutas) y actúa en ese punto concreto.

Los experimentos con ratas mostraron que la acción del fármaco (un anestésico) se limitaba al cubo de tres milímetros de lado donde se enfocó el haz. Los ultrasonidos se apuntaron a la corteza visual de los animales al tiempo que se les lanzaban destellos de luz a los ojos. La actividad cerebral en la región diana descendía cuando el haz estaba activo y volvía a recuperarse a los diez segundos de detener la estimulación, cuando el anestésico se agotaba. «Una técnica precisa en el espacio y en el tiempo que permita intervenir en el encéfalo de manera focalizada constituye un avance impresionante», afirma Nir Lipsman, neurocientífico del Instituto de Investigación Sunnybrook de Toronto que no participó en el estudio. El equipo también constató un descenso de la actividad metabólica en regiones cerebrales distantes pero conectadas a las manipuladas, por lo que el método podría servir también para cartografiar los circuitos cerebrales.

Los investigadores no observaron daños en los tejidos. «Han hecho un buen trabajo demostrando su inocuidad», opina Lipsman. El estudio no es más que una prueba de concepto, pero Airan sostiene que su paso a la clínica debería ser rápido. Los ultrasonidos son habituales en medicina, y las nanopartículas se componen de sustancias usadas habitualmente en radiología y en el tratamiento del cáncer. «Solo nos queda demostrar que su combinación es segura», aclara Airan. «Estamos hablando de un primer ensayo en seres humanos de aquí a uno o dos años.»

El siguiente paso consistirá en comprobar si la técnica permite simular los efectos de una neurocirugía anestesiando el lecho quirúrgico y confirmando que este puede desactivarse sin peligro. Además, el método podría servir también para administrar psicofármacos en zonas específicas del encéfalo y, con ello, reducir los efectos secundarios y mejorar su eficacia. «El abanico de posibilidades aturde», concluye Airan.

—Simon Makin

NASA, JPL-CALTECH, CXC, ESA/NRAO Y J. RHO, INSTITUTO SETI (*supernova*); ALFRED PASIEKA/GETTY IMAGES (*cerebro*)

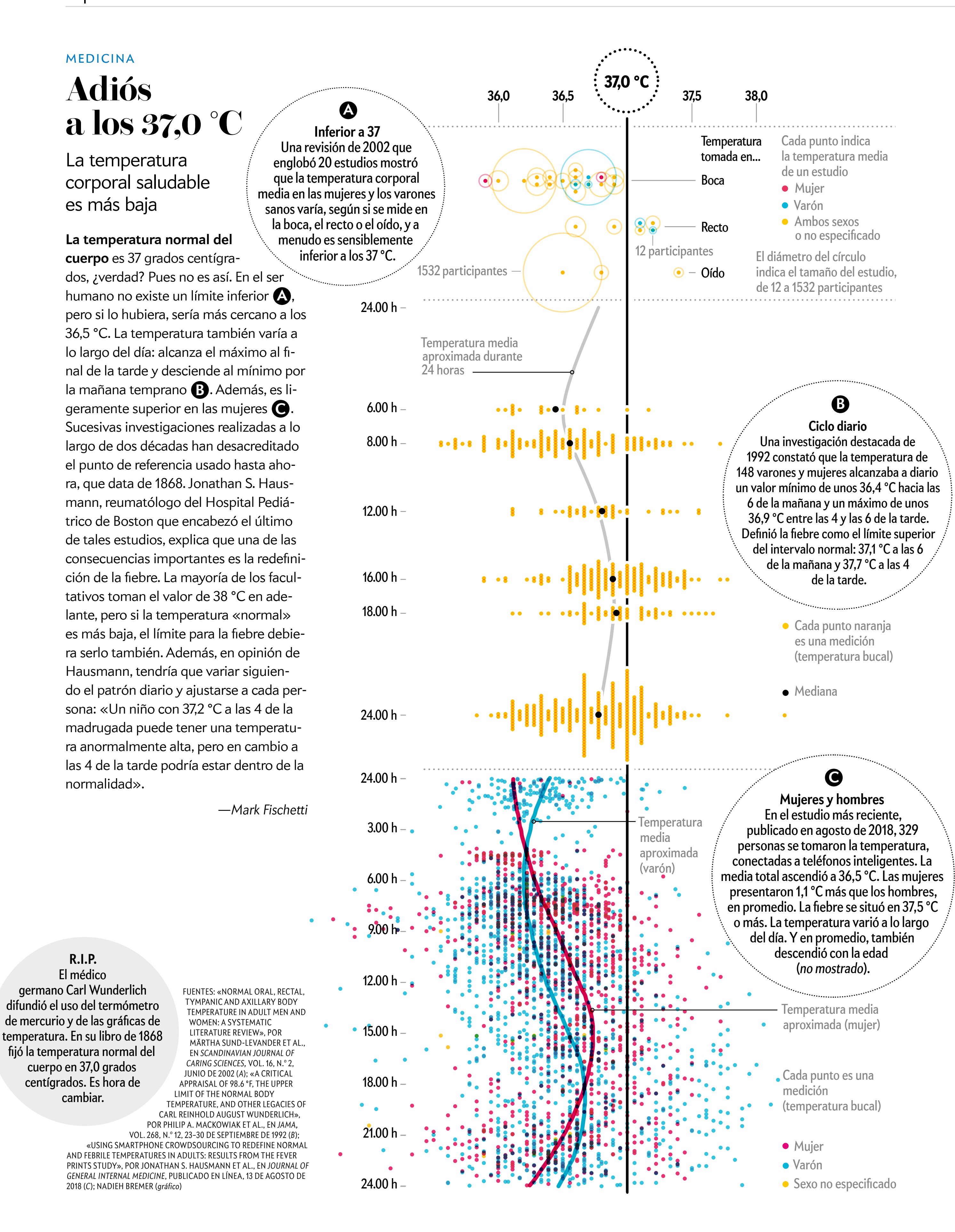
MEDICINA

Adiós a los 37,0 °C

La temperatura corporal saludable es más baja

La temperatura normal del cuerpo es 37 grados centígrados, ¿verdad? Pues no es así. En el ser humano no existe un límite inferior **A**, pero si lo hubiera, sería más cercano a los 36,5 °C. La temperatura también varía a lo largo del día: alcanza el máximo al final de la tarde y desciende al mínimo por la mañana temprano **B**. Además, es ligeramente superior en las mujeres **C**. Sucesivas investigaciones realizadas a lo largo de dos décadas han desacreditado el punto de referencia usado hasta ahora, que data de 1868. Jonathan S. Hausmann, reumatólogo del Hospital Pediátrico de Boston que encabezó el último de tales estudios, explica que una de las consecuencias importantes es la redefinición de la fiebre. La mayoría de los facultativos toman el valor de 38 °C en adelante, pero si la temperatura «normal» es más baja, el límite para la fiebre debiera serlo también. Además, en opinión de Hausmann, tendría que variar siguiendo el patrón diario y ajustarse a cada persona: «Un niño con 37,2 °C a las 4 de la madrugada puede tener una temperatura anormalmente alta, pero en cambio a las 4 de la tarde podría estar dentro de la normalidad».

—*Mark Fischetti*



R.I.P.
El médico germano Carl Wunderlich difundió el uso del termómetro de mercurio y de las gráficas de temperatura. En su libro de 1868 fijó la temperatura normal del cuerpo en 37,0 grados centígrados. Es hora de cambiar.

FUENTES: «NORMAL ORAL, RECTAL, TYMPANIC AND AXILLARY BODY TEMPERATURE IN ADULT MEN AND WOMEN: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW», POR MÄRTHA SUND-LEVANDER ET AL., EN *SCANDINAVIAN JOURNAL OF CARING SCIENCES*, VOL. 16, N.º 2, JUNIO DE 2002 (*A*); «A CRITICAL APPRAISAL OF 98.6 °F, THE UPPER LIMIT OF THE NORMAL BODY TEMPERATURE, AND OTHER LEGACIES OF CARL REINHOLD AUGUST WUNDERLICH», POR PHILIP A. MACKOWIAK ET AL., EN *JAMA*, VOL. 268, N.º 12, 23–30 DE SEPTIEMBRE DE 1992 (*B*); «USING SMARTPHONE CROWDSOURCING TO REDEFINE NORMAL AND FEBRILE TEMPERATURES IN ADULTS: RESULTS FROM THE FEVER PRINTS STUDY», POR JONATHAN S. HAUSMANN ET AL., EN *JOURNAL OF GENERAL INTERNAL MEDICINE*, PUBLICADO EN LÍNEA, 13 DE AGOSTO DE 2018 (*C*); NADIEH BREMER (*gráfico*)



DINÁMICA DE GRUPO

Los ojos del pelotón

Las señales visuales rigen el comportamiento conjunto de los ciclistas

A semejanza de un cardumen de peces o de una bandada de pájaros, un pelotón de ciclistas suele comportarse como un ente homogéneo. Cuando distintos individuos muestran conductas sencillas a pequeña escala, del conjunto emerge un patrón que ayuda a todos. Pero en los grupos muy compactos no parece tan claro lo que determina el comportamiento de cada cual. Matemáticos y biólogos afirmaban que los movimientos de los ciclistas en el seno del pelotón dependían ante todo de la necesidad de optimizar la aerodinámica. Ahora, nuevas investigaciones plantean una explicación distinta.

Jesse Belden, del Centro de Guerra Submarina Naval de EE.UU., y Tadd Truscott, de la Universidad Estatal de Utah, han descubierto que la información visual ejerce un papel determinante en la posición que toman los ciclistas dentro del grupo: subconscientemente adoptan una formación en rombo, disposición que optimiza su visión periférica, la cual les permite responder con celeridad a los cambios repentinos de movimiento de los demás.

Las parejas de ciclistas ahorran mucha energía cuando el segundo se coloca tras la rueda del que encabeza la marcha. Pero en los pelotones, explica Belden, «no se aprecia esa colocación. La aerodinámica solo es importante en el borde exterior, dentro del pelotón se economizan fuerzas en cualquier punto». Estudios anteriores realizados con animales, desde langostas hasta aves, indican que la visión ayuda a modelar el grupo como un todo, pero no explican cómo condiciona el comportamiento individual. Para averiguarlo, los investigadores decidieron estudiar a los ciclistas profesionales.

Mientras examinaban las grabaciones de las etapas del Tour de Francia obtenidas desde un helicóptero, Belden, Truscott y sus colaboradores repararon en dos comportamientos que causaban ondulaciones a lo largo del pelotón similares a las de un líquido. En el primero, uno de los corredores frena y los demás aminoran la marcha para evitar la colisión. En el otro, el ciclista se desplaza a un lado para esquivar un obstáculo u ocupar un hueco. Estos movimientos generan en el pelotón ondas que van hacia adelante y hacia atrás o a izquierda y derecha, respectivamente. Las ondas laterales se propagan con relativa lentitud, a la velocidad a la que un individuo tarda en responder a un cambio de posición súbito del vecino. Pero las que se desplazan hacia adelante y atrás son mucho más rápidas, lo que significa que los individuos anticipan los movimientos de quien pedalea dos lugares por delante de su posición.

Tales ondulaciones indican que la visión es el principal determinante del comportamiento individual, pues un corredor quiere mantener a sus vecinos dentro del intervalo de su visión periférica, más sensible al movimiento. Aparte de los objetivos tácticos de la etapa de carrera, el propósito principal de cualquier ciclista es no chocar, lo que consigue manteniendo una posición que permita prestar atención a lo que está sucediendo delante y, al mismo tiempo, mantener la mayor separación posible de los que le flanquean. El trabajo se presentó el pasado noviembre en la 71.ª reunión anual de la División de Dinámica de Fluidos de la Sociedad Estadounidense de Física.

Los autores aseguran que sus hallazgos serían aplicables al comportamiento colectivo de los animales y ayudarían a optimizar los planes de evacuación en espacios atestados o a programar enjambres de robots autónomos. —*Rachel Berkowitz*

JEFF PACHOUD/GETTY IMAGES (*ciclistas*); NASA (*50 años de la llegada a la Luna*)

AGENDA

CONFERENCIAS

6 de marzo
Richard Feynman (1918-1988): Genio y figura de la física
José Bernabéu, Universidad de Valencia
Fundación Ramón Areces
Madrid
www.fundacionareces.es

7 de marzo
La astronomía en la época romántica
Asunción Fuente, Observatorio Astronómico Nacional
Museo del Romanticismo
Madrid
culturaccosmos.es

12, 19 y 26 de marzo — Ciclo
50 años de la llegada a la Luna
Varios ponentes
CosmoCaixa
Barcelona
cosmocaixa.es



14 de marzo
¿Qué es y qué hace la historia de la ciencia?
Miquel Carandell, Centro de Historia de la Ciencia UAB
Centro Cívico Guinardó
Barcelona
ajuntament.barcelona.cat

EXPOSICIONES

Tecnología para la salud
Parque de las Ciencias
Granada
www.parqueciencias.com

Máquinas de Leonardo da Vinci
Museo de la Ciencia
Valladolid
www.museocienciavalladolid.es

OTROS

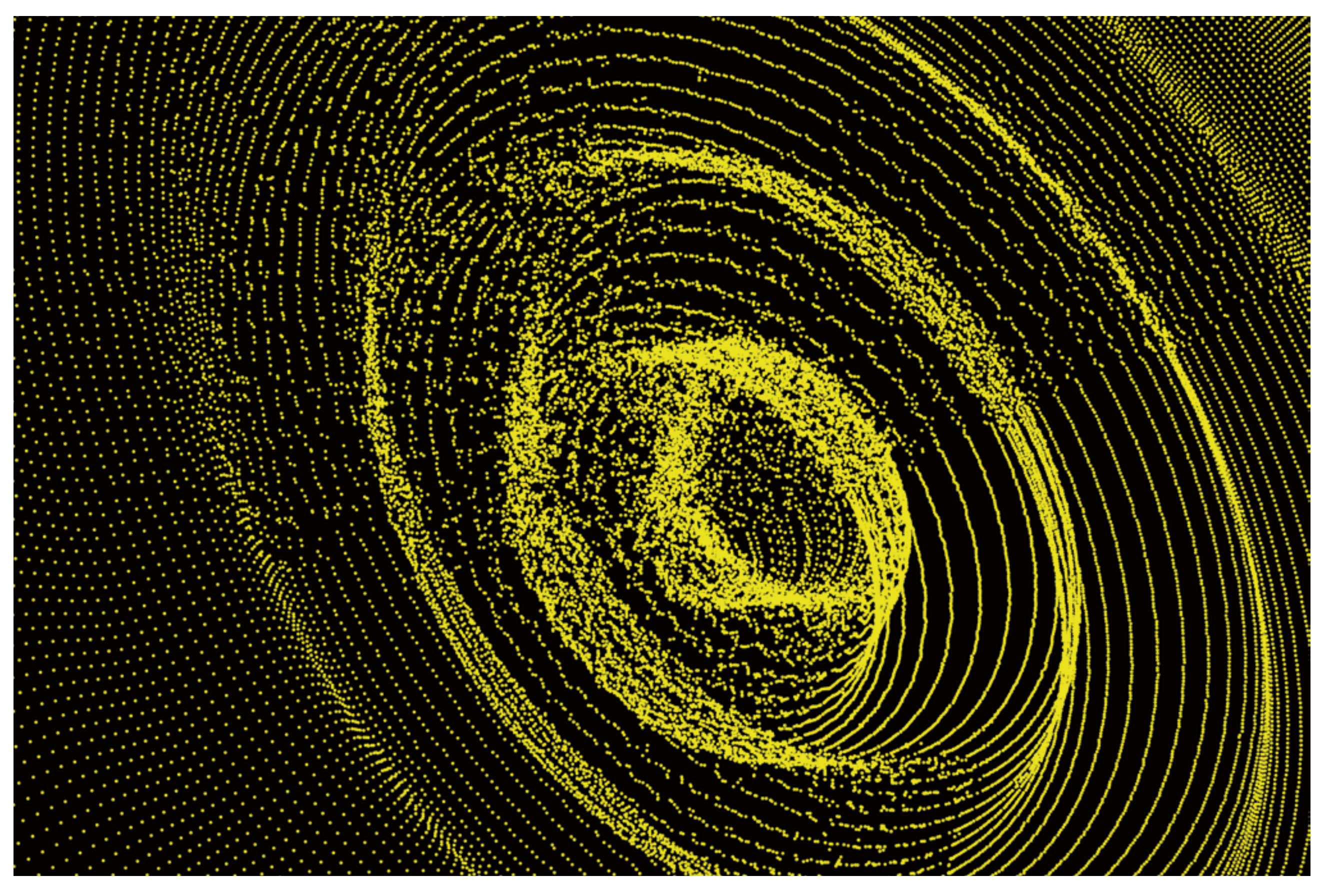
14 de marzo — Jornada matemática
Sin π no soy nada
Universidad de Granada
Granada
www.piday.es

FÍSICA CUÁNTICA

Óptica cuántica sin fotones

Un nuevo montaje ha usado el comportamiento ondulatorio de los átomos para simular algunos aspectos exóticos de la interacción entre la luz y la materia

ALEJANDRO GONZÁLEZ TUDELA Y J. IGNACIO CIRAC



ONDAS ATÓMICAS: Bajo las condiciones adecuadas, la materia puede exhibir propiedades ondulatorias (*recreación artística*). Un trabajo ha aprovechado este fenómeno para simular la emisión de luz en condiciones exóticas.

La óptica cuántica es la teoría fundamental que describe la interacción entre la luz y la materia. Una de sus consecuencias más llamativas y tangibles es que, en el vacío (el estado en el que no hay fotones), un átomo excitado puede regresar a su estado fundamental mediante la emisión de un fotón, un proceso conocido como emisión espontánea. En 1946, Edward Mills Purcell propuso que dicho fenómeno debería poder controlarse con ayuda de estructuras que alterasen el entorno. Un ejemplo lo hallamos en los cristales fotónicos: aislantes que impiden que la luz de ciertas frecuencias se propague a su través.

En los años noventa, los físicos Sajeev John y Tran Quang, de la Universidad de Toronto, predijeron que la emisión espontánea en un cristal fotónico produciría desexcitaciones inusuales. En ellas, los fotones adoptarían un estado de superposición: serían emitidos al entorno pero, al mismo tiempo, permanecerían localizados alrededor de los átomos emisores. En un artículo publicado hace poco en *Nature*, Ludwig Krinner, de la Universidad de Stony Brook, y otros investigadores han anunciado la primera observación de la dinámica de esas desexcitaciones exóticas. Sin embargo, no lo han conseguido empleando fotones, sino átomos ultrafríos.

Átomos apresados

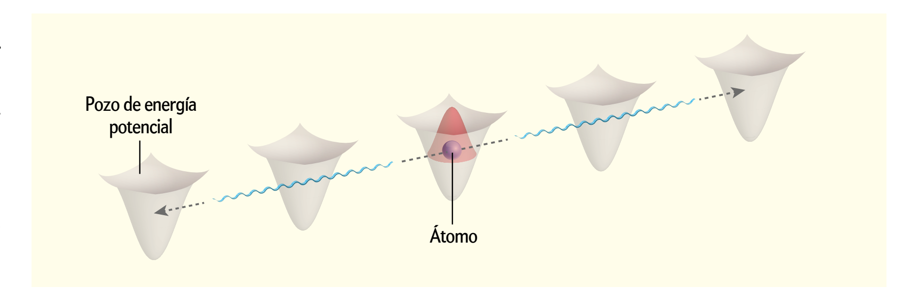
Los átomos de Krinner y sus colaboradores se hallaban atrapados en redes ópticas: retículos lumínicos que se forman haciendo coincidir rayos láser, de modo que la interferencia entre ellos genere un patrón periódico en la intensidad de la luz. En los mínimos de esa configuración periódica es donde quedan atrapados los átomos.

Dada su naturaleza cuántica, los átomos pueden pasar de un sitio de la red a otro adyacente por efecto túnel. La probabilidad de que eso ocurra puede ajustarse modificando las intensidades de los láseres. Dado que estos sistemas pueden controlarse con precisión y muestran poca decoherencia (los átomos están muy bien aislados del entorno y, por tanto, se

comportan de manera ideal), constituyen una plataforma casi perfecta para simular problemas cuánticos complejos, como los que encontramos en la física de la materia condensada o en física de altas energías [*véase* «Simulación cuántica de procesos en física de partículas», por Esteban A. Martínez; Investigación y Ciencia, diciembre de 2016]. Ahora, Krinner y sus colaboradores han demostrado que los mismos sistemas pueden usarse también para simular fenómenos de óptica cuántica.

En su trabajo, los autores se basaron en un esquema propuesto en 2008 por Inés de Vega y Diego Porras, del Instituto Max Planck de Óptica Cuántica de Garching, y uno de los autores de este artículo (Cirac). La idea se basa en usar átomos (en este caso, de rubidio) con dos estados internos, cada uno de los cuales responde de manera diferente a una red óptica bidimensional.

Un estado, llamémosle *A*, «ve» las regiones de alta intensidad luminosa como pozos de energía potencial de los que no puede salir. El otro, al que denominaremos *F*, apenas nota esos pozos, de modo que los átomos que presenten dicha configuración podrán propagarse a través de la red óptica en forma de ondas de materia. Así pues, un átomo en un estado *A* representará un emisor de ondas de materia en un estado excitado, mientras que un átomo en un estado *F* se comportará como un fotón que puede escapar por emisión espontánea. Para completar la analogía con los fenómenos de desexcitación atómica en un entorno fotónico estructurado, ambos estados internos se encuentran acoplados entre sí por medio de campos externos, de modo que un átomo inicialmente excitado puede transformarse en una onda de materia que se propaga por la red.



EMISORES DE ONDAS DE MATERIA: Un trabajo reciente ha atrapado átomos de rubidio (*lila*) en una red óptica unidimensional (*pozos grises*) formada a partir de la interferencia entre haces láser (*no mostrados*). Cada átomo posee dos estados internos: uno de ellos (*rojo*) se halla confinado en las inmediaciones del átomo, mientras que el otro (*azul*) se superpone con los pozos de potencial adyacentes. Al ajustar los parámetros del sistema, los investigadores lograron que los sitios ocupados de la red emitieran ondas de materia (*flechas punteadas*). Dicho proceso emula la emisión de fotones por parte de átomos confinados en cristales fotónicos, un entorno en el que los procesos de emisión revisten características poco comunes.

Emisión exótica

En sus experimentos, los investigadores simularon el caso más simple de emisión espontánea en un cristal fotónico y el que permite entender mejor estos procesos: la emisión espontánea de un único fotón en el vacío. Al ajustar los parámetros experimentales, consiguieron observar un fenómeno conocido como «desexcitación fraccionaria», en el que el emisor acaba en un estado de superposición cuántica entre el estado excitado y el fundamental.

Además, los autores indican haber obtenido pruebas directas de que la probabilidad de que el emisor permanezca en el estado excitado no disminuye de manera exponencial con el tiempo. Tanto la desexcitación fraccionaria como ese comportamiento no exponencial constituyen dos de los efectos más peculiares que inducen los cristales fotónicos. Las nuevas mediciones resultan análogas a otras ya publicadas sobre la emisión espontánea de fotones en las regiones visible y de microondas del espectro. Hasta ahora, sin embargo, nadie había conseguido medir la dinámica de la desexcitación.

La plataforma de los autores presenta varias características útiles más allá de su excelente capacidad de control y baja decoherencia. En primer lugar, permite emular cristales fotónicos con distintas geometrías, así como simular entornos tridimensionales en los que surgen otros aspectos poco usuales de la emisión espontánea. Además, hace posible acceder a regímenes que se encuentran fuera del alcance de las implementaciones ópticas, como situaciones en las que existe un fuerte acoplamiento entre los emisores y su entorno. Por último, abre la puerta a estudiar la emisión espontánea en entornos aún más exóticos, como aquellos que proporcionan los materiales conocidos como aislantes topológicos, si bien para ello habría que adaptar el diseño y aumentar la eficiencia de detección.

Junto con las plataformas fotónicas en las regiones visible y de microondas, el sistema de Krinner y sus colaboradores desbroza el camino para futuros estudios sobre sistemas no tradicionales de óptica cuántica. Si el montaje se amplía para incluir un gran número de emisores, tal vez puedan observarse fenómenos colectivos de emisión espontánea imposibles de predecir con los métodos computacionales actuales, así como simular interacciones entre emisores que no pueden generarse con otras plataformas.

Alejandro González Tudela
es investigador en el Instituto de Física Fundamental del CSIC.
J. Ignacio Cirac *investiga en el Instituto Max Planck de Óptica Cuántica de Garching.*

Artículo original publicado en *Nature* vol. 559, págs. 481-482, 2018.
Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2019

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Spontaneous emission near the edge of a photonic band gap. Sajeev John y Tran Quang en *Physical Review A*, vol. 50, págs. 1764-1769, 1994.
Matter-wave emission in optical lattices: Single particle and collective effects. Inés de Vega, Diego Porras y J. Ignacio Cirac en *Physical Review Letters*, vol. 101, art. n.º 260404, 2008.
Spontaneous emission of matter waves from a tunable open quantum system. Ludwig Krinner et al. en *Nature*, vol. 559, págs. 589-592, 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Cristales fotónicos. Eli Yablonovitch en *IyC*, febrero de 2002.
Objetivos y oportunidades de la simulación cuántica. J. Ignacio Cirac y Peter Zoller en *IyC*, noviembre de 2012.
Mundos cuánticos simulados. Oliver Morsch e Immanuel Bloch en *IyC*, mayo de 2015.

SALUD AMBIENTAL

Cuando la primera línea de defensa fracasa

Los contaminantes ambientales son más dañinos para la piel de lo que se creía. Sus efectos pueden abarcar desde una mera irritación hasta la muerte

ELIZABETH SVOBODA



NUMEROSAS CIUDADES del mundo presentan niveles de contaminantes atmosféricos semejantes a los de la cuenca del Ruhr (*arriba*). Los habitantes de esta región sufren una mayor incidencia de dermatitis crónicas y más manchas seniles que los de zonas más limpias.

LUKAS SCHULZE/GETTY

En algunas metrópolis asiáticas es habitual usar mascarilla para no inhalar los contaminantes que saturan el aire de las calles, impidiendo que lleguen a los pulmones. Hace más de diez años, el dermatólogo Jean Krutmann comenzó a preguntarse si dichos contaminantes afectaban también al mayor órgano del cuerpo humano: la piel. Junto con sus colaboradores, se dispuso a estudiar cómo evolucionaba la salud de asiáticos y europeos habitualmente expuestos a las emisiones de los tubos de escape, como el dióxido de nitrógeno o las partículas en suspensión.

Los primeros resultados de Krutmann hicieron sonar todas las alarmas. Las personas expuestas a los contaminantes atmosféricos comunes tienen una mayor incidencia de dermatitis crónicas y más manchas seniles que las que viven en zonas más limpias. «Me había imaginado que los resultados no serían concluyentes», asegura Krutmann, director del Instituto Leibniz de Investigación en Salud Ambiental, de Düsseldorf: «A todos nos sorprendió comprobar que había una asociación tan marcada».

La piel, la barrera blanda y flexible que recubre el cuerpo, es lo suficientemente porosa para absorber la humedad o los fármacos administrados en forma de parche y para exudar emulsiones protectoras, pero esa misma porosidad también la hace vulnerable a los compuestos ambientales. Además, la radiación ultravioleta del sol puede provocar envejecimiento prematuro de la piel y tumores cutáneos, como el carcinoma espinocelular, mediante un mecanismo que se conoce desde hace decenios. En los últimos tiempos, se ha investigado mucho en este campo y se han descubierto los graves efectos que pueden tener para la piel los contaminantes, los plaguicidas y otras sustancias presentes en el aire.

«En el último decenio, ha crecido enormemente el interés científico por los nuevos agresores ambientales», afirma Whitney Bowe, dermatóloga de la Escuela de Medicina Icahn del Monte Sinaí, en Nueva York. Y aunque el daño que causa esta exposición suele circunscribirse a la piel, también puede ser mucho más profundo. Los contaminantes y los compuestos que atraviesan la piel pueden contribuir al desarrollo de enfermedades como el asma o el cáncer de mama, así que los científicos están indagando maneras novedosas de mantener a raya esas incursiones cutáneas.

Entrada intempestiva

La piel puede verse afectada por el entorno de diversas maneras. La más obvia es la exposición directa: si se sumerge

un brazo en una tina de acetona o benceno, la sustancia entrará en la piel por difusión.

La radiación ultravioleta no penetra en la piel de la misma manera, pero puede desencadenar una reacción química destructiva. Cuando se topa con moléculas que contienen oxígeno en la superficie de la piel, se crean compuestos inestables denominados «radicales libres». Para estabilizarse, los radicales arrebatan electrones a las moléculas aledañas: este proceso se conoce como oxidación y puede dañar el ADN de las células cutáneas, lo que provoca la inflamación del tejido, acelera el envejecimiento de la piel y favorece las mutaciones que desembocan en cáncer.

Sin embargo, a veces las sustancias del entorno se introducen en la piel por mecanismos menos evidentes. «Aunque no nos demos cuenta, nuestra piel está siempre expuesta», explica Frederick Frasch, coordinador de programas en el Instituto Nacional de los Estados Unidos para la Seguridad y la Salud Ocupacional, en Morgantown (Virginia Occidental): «Si una sustancia es tóxica al ingerirla o inhalarla, también lo será si se absorbe por la piel». Tanto el esmog de Pekín como las nubes de plaguicidas del Valle Central de California o el humo de los incendios que han azotado el oeste de los Estados Unidos contienen una gran variedad de sustancias peligrosas, muchas de las cuales todavía no han sido identificadas.

«Muchos contaminantes atmosféricos son tan minúsculos que se cuelan por los poros de la piel igual que caería un puñado de gravilla dentro de una taza», ilustra Bowe. Otros, como los hidrocarburos aromáticos policíclicos, presentes en el humo de los tubos de escape o de los incendios forestales, son lipofílicos (tienen afinidad por la grasa), de modo que atraviesan con facilidad los intersticios repletos de lípidos que hay entre las células cutáneas. De allí, pasan al sistema circulatorio y pueden afectar a todo el organismo.

El efecto más frecuente de la exposición a los contaminantes ambientales es la irritación cutánea localizada, comenta Sean Semple, especialista en higiene del trabajo de la Universidad de Stirling. Pero en algunos casos puede haber problemas más graves y duraderos: las concentraciones elevadas de contaminantes aéreos se han asociado con infertilidad, asma e incluso algunos tipos de cáncer; los plaguicidas pueden alterar las funciones cerebrales y neurológicas con el tiempo; y



LULU WESCHLER

LOS PARTICIPANTES de un estudio se expusieron a ftalatos en el aire. Los que llevaban escafandra absorbían la misma cantidad de esta sustancia por la piel que los que no la llevaban.

los ftalatos —que se utilizan para conferir flexibilidad al plástico, pero cuando este se degrada se liberan al ambiente— se han relacionado con desequilibrios hormonales en los niños y con anomalías del desarrollo reproductivo en los fetos.

Cartografía de la exposición

Uno de los principales objetivos de los ecólogos es documentar el alcance y la gravedad de los efectos dermatológicos de la contaminación atmosférica. «La contaminación del aire no afecta [solamente] a las megalópolis del Extremo Oriente, sino también a los países occidentales, así que no podemos huir de ella», afirma Krutmann, quien ha estudiado una cohorte de mujeres mayores de la cuenca del Ruhr (una de las grandes áreas metropolitanas de Alemania) expuestas a los mismos niveles de contaminación viaria que hay en muchas otras ciudades del mundo. Después de aplicar los ajustes correspondientes al nivel socioeconómico, el tabaquismo y la exposición a la radiación ultravioleta, entre otros factores, Krutmann ha llegado a la conclusión que la contaminación ha contribuido al envejecimiento acelerado de la piel que presentan las participantes. Ya había obtenido resultados parecidos en una cohorte de mujeres chinas de la etnia han, residentes de una zona urbana. En 2018, junto con sus colaboradores, amplió esa investigación para demostrar que las ancianas expuestas a la contaminación viaria sufren una mayor incidencia de eccemas, una enfermedad inflamatoria dermoepidérmica caracterizada por la aparición de eritema y descamación.

En el laboratorio, los científicos trabajan para dilucidar el mecanismo exacto por el cual la contaminación atmosférica ejerce estos efectos. En un estudio de 2017 en el que participaron científicos del Centro de Vigilancia Ambiental de Cantón, se expusieron células inmortalizadas de piel humana a material particulado (una mezcla de polvo microscópico, hollín y partículas de los gases de escape, que suele hallarse suspendida en el aire) y se constató que se formaban radicales libres, se lesionaba el ADN y las células morían.

La piel también es vulnerable a los ftalatos. Se sabe desde hace tiempo que estos disruptores endocrinos son peligrosos si se ingieren, pero Charles Weschler, que investiga la exposición a contaminantes en la Universidad Rutgers en Piscataway (Nueva Jersey), sospechaba que los ftalatos también pueden suponer una amenaza cuando pasan de los artículos de consumo doméstico al ambiente intradomiciliario. Para medir la eficiencia con la que la piel absorbe los ftalatos presentes en el aire, Weschler confinó durante seis horas a un grupo de personas en salas llenas de aire con altas concentraciones de ftalatos. En un ensayo, los participantes se pusieron una escafandra con la que solo respiraron aire filtrado, mientras que en otro no se pusieron escafandra y respiraron con normalidad.

Weschler descubrió que los participantes absorbían la misma cantidad de ftalatos a través de la piel, a veces inclu-

so más, que a través de los pulmones. El científico estima que la absorción cutánea de ftalatos quizá sea más acusada en entornos reales como la vivienda, donde se acumulan con el tiempo. «Los modelos indican que, si hubiésemos proseguido con los experimentos dos días más, la cantidad absorbida se habría quintuplicado», añade.

Los plaguicidas que se usan en la agricultura y la jardinería también pueden entrañar un peligro semejante para la piel. En 2018, un equipo de la Universidad Griffith en Nathan publicó un estudio realizado con una serie de agricultores ghaneses que aplicaban clorpirifós, un plaguicida de uso corriente, a los arrozales. Se determinó la cantidad de residuo de plaguicida que se filtraba por su vestimenta y entraba en contacto con la piel y, a partir de esos datos, se calculó que muchos de los arroceros absorbían una dosis del plaguicida varias veces superior al umbral que incrementa el riesgo de sufrir toxicidades agudas, como confusión y desarreglos intestinales. Desde hace mucho los plaguicidas se relacionan con diversos trastornos dermatológicos, como la dermatitis de contacto, el acné y hasta el melanoma. Los resultados de Ghana sugieren que estas afecciones podrían ser consecuencia directa de la absorción de plaguicida en la piel.

Con todo, sigue habiendo muchas incógnitas sobre los niveles de exposición cutánea a los contaminantes a lo largo de la vida de una persona. Laura Vandenberg, experta en salud ambiental de la Universidad de Massachusetts en Amherst, estudia los efectos sobre la piel del bisfenol A, una sustancia muy prevalente. En un estudio, investigó la exposición de la piel al bisfenol A que se utiliza en el papel térmico de los recibos de compra. Teniendo en cuenta ese estudio y otros experimentos, Vandenberg sostiene que los organismos públicos responsables de evaluar los riesgos químicos, como la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria, posiblemente infravaloren las exposiciones cutáneas de la población. Sin embargo, determinar correctamente los niveles de exposición y predecir sus efectos para la salud entraña enormes dificultades. Por ejemplo, dos agricultores que desempeñen labores diferentes en una misma explotación pueden estar expuestos a niveles totalmente distintos de plaguicida por vía cutánea. Por otro lado, las variaciones genéticas hacen que sea aún más difícil prever los efectos concretos de la exposición a los plaguicidas sobre la piel y sobre la salud general de una persona.

Los estudios a gran escala son la mejor forma de valorar el vínculo entre la absorción dérmica, los niveles de exposición ambiental y la influencia genética, así como los efectos de todo este conjunto de factores sobre la salud. Por ahora, sin embargo, lo más prudente es limitar la exposición a los contaminantes aplicando el sentido común, por ejemplo, con crema solar de alta graduación en las zonas de piel descubiertas y vestimenta protectora.

Otra forma de proteger la piel, sobre todo contra los radicales libres, explica Krutmann, es utilizar cremas ricas en antioxidantes. Estas neutralizan los radicales libres en la superficie cutánea y contribuyen a detener la cascada de destrucción celular. Krutmann señala que muchos de estos productos, sobre todo los que contienen vitamina C o E, funcionan bien para mitigar el daño celular. La absorción dérmica de contaminantes atmosféricos es un problema complejo, pero Krutmann cree que la solución puede ser tan sencilla como reforzar la barrera protectora que ya proporciona la piel de por sí.

Elizabeth Svoboda
es periodista científica.

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 563, págs. S89-S90, 2018. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2019

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Traffic-related air pollution contributes to development of facial lentigines: Further epidemiological evidence from Caucasians and Asians. Anke Hüls et al. en *Journal of Investigative Dermatology*, vol. 136, págs. 1053-1056, mayo de 2016.

Traffic-related air pollution and eczema in the elderly: Findings from the SALIA cohort. Winnie Schnass et al. en *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, vol. 221, págs. 861-867, julio de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Riesgos del bisfenol A. Heather Patisaul en *IyC*, abril de 2010.

La acción oculta de los disruptores endocrinos. Esther Fuentes y Ángel Nadal en *IyC*, agosto de 2017.

SOSTENIBILIDAD

Transformar el sistema alimentario global

Una combinación de medidas permitiría solucionar los problemas ambientales derivados del aumento futuro de la demanda mundial de alimentos

GÜNTHER FISCHER

La población mundial en 2010 se situaba en unos 6900 millones de personas, una cifra que se prevé que ascenderá a entre 8500 y 10.000 millones hacia 2050. El incremento demográfico traerá consigo un aumento de la demanda y de la producción de alimentos que provocará un deterioro ambiental del planeta. Marco Springmann, de la Universidad de Oxford, y sus colaboradores han publicado un trabajo donde analizan las presiones ambientales derivadas del sistema alimentario global estimado para 2050. Los autores también han modelizado los efectos de diferentes alternativas para mitigar las consecuencias ambientales de la producción de comida.

La seguridad alimentaria ha supuesto un reto durante mucho tiempo para las sociedades humanas y supone un problema acuciante a escala mundial. De hecho, muchas de las metas planteadas en ese ámbito forman parte de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, entre los que figuran erradicar



REDUCIR LA GRAN CANTIDAD DE ALIMENTOS que se desperdician, como estos que se desechan antes de que lleguen a los consumidores, contribuiría a mejorar el sistema alimentario mundial.

el hambre, poner fin a la pobreza y combatir el cambio climático. Evidentemente, obtener un sistema alimentario global sostenible exige progresos en los frentes sociales, económicos y ambientales.

Springmann y sus colaboradores han elaborado un modelo para evaluar cuál será la demanda global de productos agrícolas hacia 2050, país por país, de acuerdo con los cambios esperados en la demografía, los ingresos y las preferencias nutricionales para esa fecha. Se ha previsto que los ingresos globales en 2050 aumentarán entre 3 y 4 veces en relación con su valor en 2010. Las predicciones de los autores acerca del futuro consumo de comida se basan en una serie de relaciones estadísticas establecidas entre demandas de alimentos y variaciones en los ingresos o en la población. Según sus predicciones, hacia 2050 habrá una menor desnutrición, se producirá un giro hacia un mayor consumo global de productos derivados de la ganadería y se mantendrá un consumo constante per cápita de productos agrícolas básicos.

Los autores han estimado las consecuencias ambientales mundiales derivadas de la producción de alimentos prevista hacia mediados del presente siglo. Su análisis se centra en varios factores de presión ambiental: las emisiones de gases de efecto invernadero ligadas a la producción agrícola; la explotación agrícola de la tierra, dadas las repercusiones que podría tener el cambio en el uso del suelo (como la pérdida de carbono o de la biodiversidad); la demanda de agua para regar los campos; y la aplicación de abonos a base de nitrógeno o fósforo, un factor fundamental porque comporta la emisión de gases de efecto invernadero y la posible contaminación de suelos o ecosistemas acuáticos.

Combinación de intervenciones

En su análisis, los investigadores han comparado las consecuencias ambientales previstas en 2050 con un conjunto de límites planetarios propuestos en 2009 por un equipo internacional de expertos dirigidos por Johann Rockström, de la Universidad de Estocolmo [*véase* «Límites de un planeta sano», por Jonathan Foley; Investigación y Ciencia, junio de 2010] para definir un espacio seguro y sostenible para las actividades humanas.

De este modo, Springmann y sus colaboradores han establecido los límites para las emisiones de gases de efecto invernadero teniendo en cuenta el umbral necesario para que el calentamiento global no supere 2 ºC por encima de los valores preindustriales. Sin embargo, su límite para los niveles de emisión es menos riguroso que el necesario para alcanzar el objetivo de 1,5 ºC fijado en el Acuerdo de París de 2015 sobre el Cambio Climático de la Convención Marco de las Naciones Unidas, analizado recientemente en un informe por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ese informe detalla que limitar el

calentamiento a 1,5 ºC, en lugar de 2 ºC, por encima de los valores preindustriales reduciría los riesgos de origen climático que afectan a la salud, los medios de sustento, la seguridad alimentaria y el abastecimiento de agua. El equipo de Springmann estima que, con los rendimientos y las prácticas agrícolas actuales, los daños ambientales asociados al sistema de producción de alimentos podrían aumentar entre un 50 y un 92 por ciento entre 2010 y 2050, con lo que se alcanzarían niveles que excederían los límites propuestos por Rockström para mantener la estabilidad del planeta.

A continuación, los investigadores analizan el efecto de intervenciones que podrían reducir esas presiones ambientales. Las medidas guardan relación tanto con la gestión de la demanda de alimentos como con la creciente eficiencia de su producción, y pueden diferenciarse en tres grandes categorías.

Una de ellas se enmarca en la mejora de las técnicas agrícolas y la gestión de recursos, lo que podría aumentar la eficiencia de la producción e incrementar las cosechas por unidad de terreno para un aporte determinado de agua y nutrientes. Otra categoría contempla cambios nutricionales en la población, que podría rebajar su consumo de carne y optar por alimentos de origen vegetal. La producción de carne suele implicar unas prácticas más intensivas y perjudiciales para el ambiente que las empleadas en la producción de vegetales. Además, el menor consumo de carne y azúcar y la mayor ingesta de fruta y verdura siguen las pautas de una dieta sana definidas por la OMS. La tercera categoría consiste en reducir el desperdicio de comida a lo largo de la cadena alimentaria, del campo al plato. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) ha estimado que hasta un tercio de la comida no llega al mercado o se desecha después de adquirirla. Reducir ese malgasto aumentaría la disponibilidad de alimentos sin necesidad de producirlos en mayor cantidad.

Springmann y sus colaboradores concluyen que interviniendo únicamente en una de las tres categorías analizadas no se alcanzaría la sostenibilidad planetaria en los cinco dominios ambientales que evalúan. Antes al contrario, se necesita un conjunto de medidas en cada una de las tres categorías para asegurar que el planeta pueda respaldar el sistema alimentario global de forma sostenible en 2050. Los autores han hallado que las emisiones previstas de gases de efecto invernadero derivadas de la agricultura no serán sostenibles a menos que se reduzca el consumo global de carne. También explican que la mejor forma de contrarrestar la expansión de los cultivos y el uso del agua consistiría en mejorar las técnicas agrícolas y en adoptar formas de gestión que maximicen las cosechas de un modo ecológicamente viable. Además, su análisis refleja que la reducción del uso de abonos requiere una combinación de medidas que mejoren las prácticas agrícolas y reduzcan la demanda de alimentos.

Puntos débiles

La evaluación de Springmann y sus colaboradores adolece de algunas limitaciones. En sus estimaciones sobre la producción agrícola futura no tienen en cuenta los efectos del cambio climático, un factor que debería ser prioritario en análisis posteriores. Además, su estudio no considera los pastizales, pese a representar más del doble de la superficie global de las tierras agrícolas, según la FAO. Los pastizales deberían tenerse en cuenta a la hora de establecer límites planetarios relacionados con el uso de la tierra. Además, el trabajo solo analiza las repercusiones ambientales de la producción de alimentos derivadas de la agricultura, pero no las evalúa en comparación con las derivadas de los sectores de la energía, el transporte y la industria.

No obstante, aun si algunos de los valores de los límites planetarios presentan amplios márgenes de incertidumbre, el análisis de los autores resulta valioso y esclarecedor en el debate sobre la obtención de un sistema alimentario sostenible que satisfaga las necesidades futuras. Además, las intervenciones propuestas no deberían implementarse bajo un enfoque único. En su lugar, cualquier marco normativo e incentivo debería ajustarse a las necesidades de cada región, aunque ello implique una inversión en educación, el acceso a los servicios sanitarios, las regulaciones del uso de la tierra o la asignación de recursos hídricos.

El estudio de Springmann tampoco aborda algunas cuestiones esenciales para el desarrollo de un sistema agrícola sólido. Para incentivar las inversiones de los agricultores no solo se necesita el derecho a acceder a las tierras y a los recursos naturales, sino también la seguridad de que se mantenga ese derecho a largo plazo. A los agricultores también se les podría motivar mediante unas mejoras en el transporte, ayudas financieras e infraestructura de comunicación que les permitieran emplear técnicas avanzadas, minimizar los riesgos de producción y dirigir sus productos hacia los mercados locales e internacionales.

Un informe reciente de la FAO concluye que la sostenibilidad ambiental y la seguridad alimentaria pueden ir de la mano hacia 2050, pero será necesario invertir para transformar el sistema alimentario global. El compromiso político y público resultará esencial para asegurar un aumento de los presupuestos destinados al desarrollo de la agricultura internacional.

La demanda de alimentos y su producción son dos miembros de la ecuación del sistema alimentario global. El trabajo de Springmann nos brinda una oportuna advertencia de que se requerirán intervenciones en ambos aspectos para obtener la seguridad alimentaria en el futuro y garantizar que las alteraciones ambientales del sistema de producción no superen los límites que la Tierra puede sostener.

Günther Fischer *es investigador del Instituto Internacional de Análisis de Sistemas Aplicados, en Austria.*

Artículo original publicado en *Nature* vol. 562, págs. 501-502, 2018.
Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2018

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

A safe operating space for humanity. Johann Rockström et al. en *Nature*, vol. 461, págs. 472-475, septiembre de 2009.
El futuro de la alimentación y la agricultura: Vías alternativas hacia 2050. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2018.
Options for keeping the food system within environmental limits. Marco Springmann et al. en *Nature*, vol. 562, págs. 519-525, octubre de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Límites de un planeta sano. Jonathan Foley en *IyC*, junio de 2010.
Un rompecabezas global. Michael E. Webber en *IyC*, febrero de 2015.
Una buena vida para todos. Mark Fischetti en *IyC*, enero de 2019.

ASTRONOMÍA

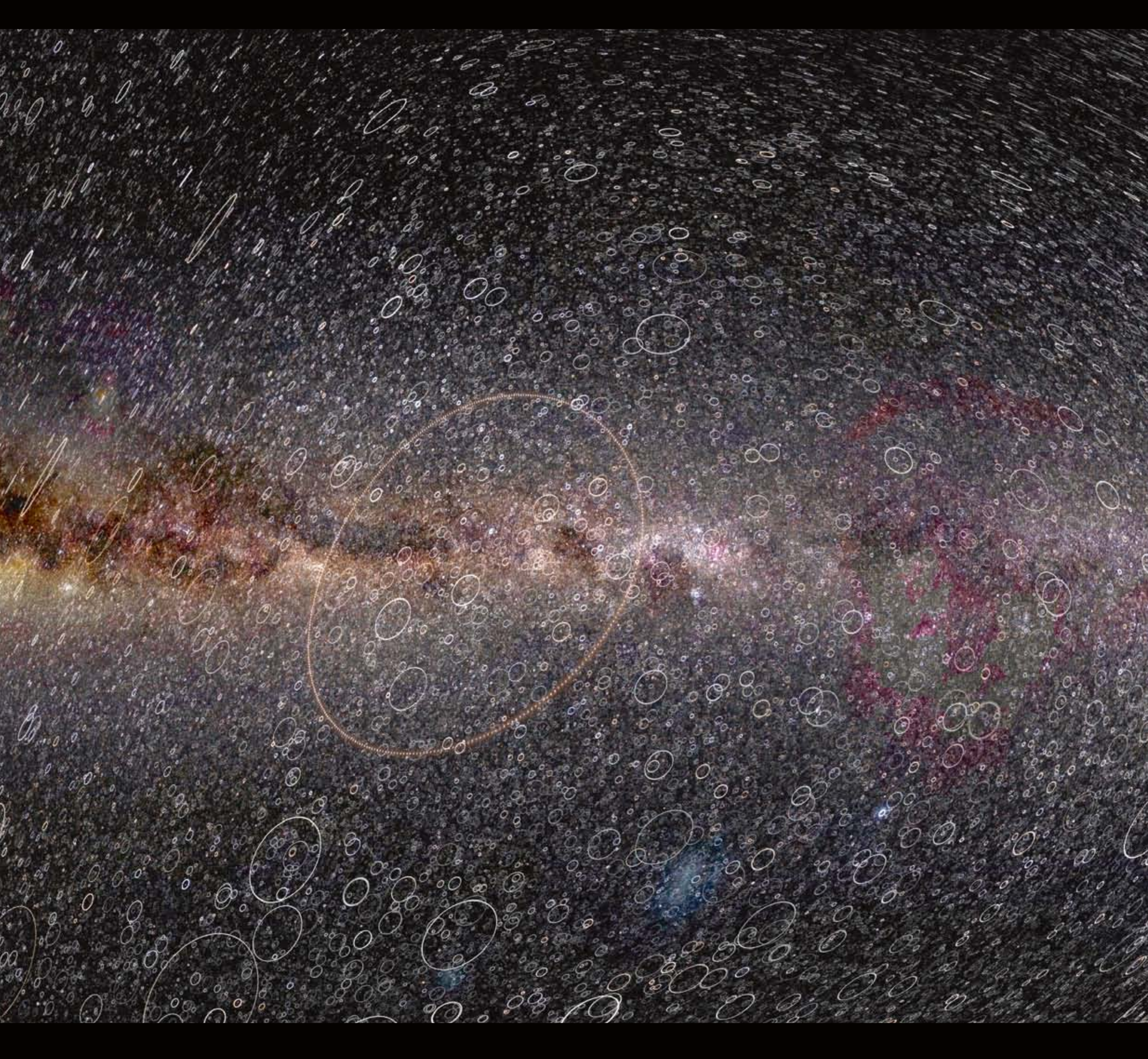
EL PRIMER MAPA 3D



La misión Gaia, de la ESA, ha cartografiado con una precisión sin precedentes 1300 millones de estrellas de la galaxia. Sus resultados están cambiando la forma de ver y entender nuestro entorno cósmico

Carme Jordi y Eduard Masana

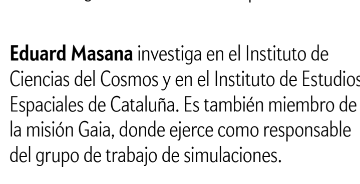
DE LA VÍA LÁCTEA



UNA NUEVA VÍA LÁCTEA: El satélite Gaia ha medido con enorme precisión las paralajes y los movimientos de millones de estrellas de la galaxia. La paralaje de un astro se debe a su movimiento aparente en el cielo (*elipses*) causado por la traslación de la Tierra alrededor del Sol. Dado su pequeño valor, en esta imagen su magnitud se ha aumentado en un factor de 100.000.

Carme Jordi investiga en el Instituto de Ciencias del Cosmos de la Universidad de Barcelona y en el Instituto de Estudios Espaciales de Cataluña. Fue miembro de la colaboración Hipparcos y actualmente trabaja en el proyecto Gaia. Forma parte del Equipo Científico de Gaia, el órgano asesor de la ESA para la misión.

Eduard Masana investiga en el Instituto de Ciencias del Cosmos y en el Instituto de Estudios Espaciales de Cataluña. Es también miembro de la misión Gaia, donde ejerce como responsable del grupo de trabajo de simulaciones.



¿Cómo se formó la Vía Láctea? ¿De dónde proceden las estrellas que la componen? ¿Cuáles son sus propiedades? Para responder a estas preguntas, a finales de 2013 la Agencia Espacial Europea (ESA) lanzó al espacio el satélite Gaia, una de las misiones astronómicas más ambiciosas de los últimos tiempos. Tras cuatro años de observaciones y análisis, en abril de 2018 el consorcio Gaia hizo público un monumental catálogo que incluía la posición, la paralaje, el movimiento, el color y el brillo de más de 1300 millones de estrellas. La enorme cantidad de objetos cartografiados, sin parangón en la historia de la astronomía, y la exquisita precisión de los datos han comenzado a transformar buena parte de lo que creíamos saber sobre nuestra galaxia y los procesos de evolución estelar.

El escenario aceptado hoy en día para explicar la creación de galaxias es jerárquico: a lo largo de la historia del cosmos, las galaxias de menor tamaño van uniéndose entre sí para formar otras cada vez mayores. Estos procesos de mezcla pueden prolongarse durante millones de años y, en la actualidad, pueden reconstruirse a partir de las órbitas y las propiedades de las estrellas individuales de una galaxia. Ello se debe a que las estrellas procedentes de una galaxia que en su día fue engullida presentarán hoy características y movimientos que permiten conocer su origen. Así pues, la mejor forma de inferir el pasado de la Vía Láctea pasa por cartografiar, con la mayor precisión posible, el movimiento, la distancia, la edad y el contenido químico de tantas estrellas como podamos. Tal es el objetivo de la misión Gaia.

El análisis de los datos de Gaia ya nos ha brindado varias sorpresas. Hemos aprendido que, hace unos 10.000 millones de años, la Vía Láctea colisionó y se fusionó con otra galaxia cuatro veces menor. Y que, en época mucho más reciente, el paso de una galaxia enana desencadenó la perturbación de las órbitas de numerosas estrellas del disco que aún podemos observar. Tanto la cantidad como la precisión de los nuevos datos están permitiendo analizar los procesos de evolución estelar como nunca antes, y ya han revelado algunos tipos de estrellas no predichos por los modelos teóricos. Más allá de nuestro entorno cósmico más inmediato, las mediciones de Gaia están revelando la dinámica de su halo difuso de estrellas y la de las galaxias enanas que nos rodean. Y esta ola de nuevos hallazgos no ha hecho más que empezar. El análisis de los datos proporcionados hasta ahora por la misión Gaia y los que están por venir mantendrán ocupados a los astrónomos durante décadas.

TESORO DE DATOS

El satélite Gaia fue lanzado al espacio en diciembre de 2013 desde la base de la ESA en Kourou, en la Guayana Francesa. Viajó hasta el punto de Lagrange L2 del sistema Sol-Tierra (situado a 1,5 millones de kilómetros de nuestro planeta en sentido opuesto al Sol) y permanecerá allí hasta el final de sus operaciones. En julio de 2014 comenzó sus observaciones científicas, las cuales continúan hasta hoy. El satélite gira alrededor de su eje cada seis horas; a su vez, dicho eje describe un movimiento de precesión en torno a la dirección Sol-Tierra con un período de 63 días. Esas dos rotaciones, combinadas con el movimiento del satélite alrededor del Sol al mismo ritmo que la Tierra (un año), permite la observación del cielo completo en aproximadamente seis meses.

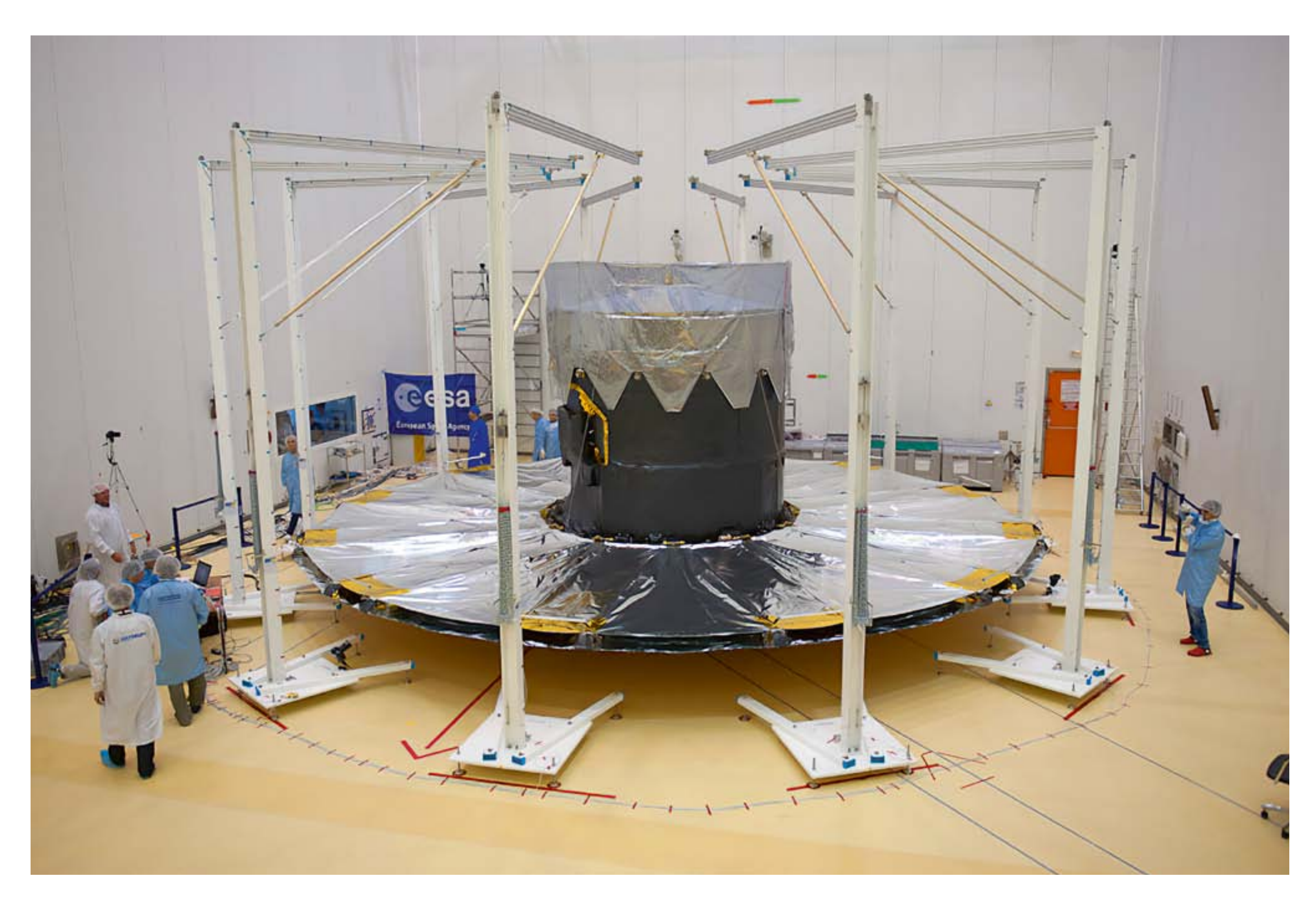
Gracias a ese barrido continuo de la bóveda celeste, Gaia inspecciona un promedio de 70 millones de estrellas cada día. Cada una de estas observaciones consta de nueve medidas de la posición y el brillo, la obtención de dos espectros de baja resolución en la parte azul y roja de la región visible del espectro electromagnético, así como de otros tres espectros de mayor resolución en la zona infrarroja. Los primeros permiten inferir el tipo de astro que estamos observando y sus propiedades físicas, como la temperatura y la gravedad en su superficie. Los segundos se emplean para determinar la velocidad de la estrella a lo largo de la línea de visión y su contenido químico. Gaia

EN SÍNTESIS

A lo largo de la historia cósmica, la Vía Láctea fue creciendo por acreción sucesiva de galaxias de menor tamaño. Esas interacciones dejaron su huella en las propiedades, posiciones y velocidades de las estrellas.

Con el objetivo de estudiarlas, a finales de 2013 la Agencia Espacial Europea lanzó al espacio el satélite Gaia. El año pasado, la misión publicó el catálogo estelar más extenso y preciso de la historia de la astronomía.

Los nuevos datos ya han revelado varios episodios significativos relativos al pasado de la Vía Láctea y a la evolución de sus estrellas. Sus resultados están transformando diversas áreas de la astrofísica y la cosmología.



ANTES DEL LANZAMIENTO: Los ingenieros de la Agencia Espacial Europea se disponen a inspeccionar el satélite Gaia en la base de Kourou, en la Guayana Francesa, en octubre de 2013. Con una masa total de unas dos toneladas, el satélite fue enviado al espacio el mes de diciembre de ese año.

ESA/CNES/ARIANESPACE/OPTIQUE VIDÉO DU CSG/G. BARBASTE

está equipado con un conjunto de 106 dispositivos de carga acoplada (CCD), equivalentes a una cámara de un gigapíxel (mil millones de píxeles), lo que lo convierte en la mayor cámara jamás lanzada al espacio. El 14 de abril de 2018, dos semanas antes de la publicación del último catálogo, Gaia alcanzó la cifra de 100.000 millones de observaciones.

Esa ingente cantidad de datos se recibe en tierra y se procesa para extraer la información correspondiente a cada estrella: su posición y su movimiento, ambos en tres dimensiones (sobre la bóveda celeste y a lo largo de la línea de visión), y sus propiedades físicas y químicas. El consorcio para el procesado de datos (DPAC, por sus siglas en inglés) incluye seis centros de cálculo y ocupa a unas 400 personas, entre científicos e ingenieros, en diversos países europeos. La contribución española al DPAC representa un 10 por ciento del total, con equipos ubicados en Barcelona, Galicia, Santander y Madrid. En Barcelona se encuentra también uno de los centros de cálculo, que engloba al Centro de Supercomputación de Barcelona y al Consorcio de Servicios Universitarios de Cataluña.

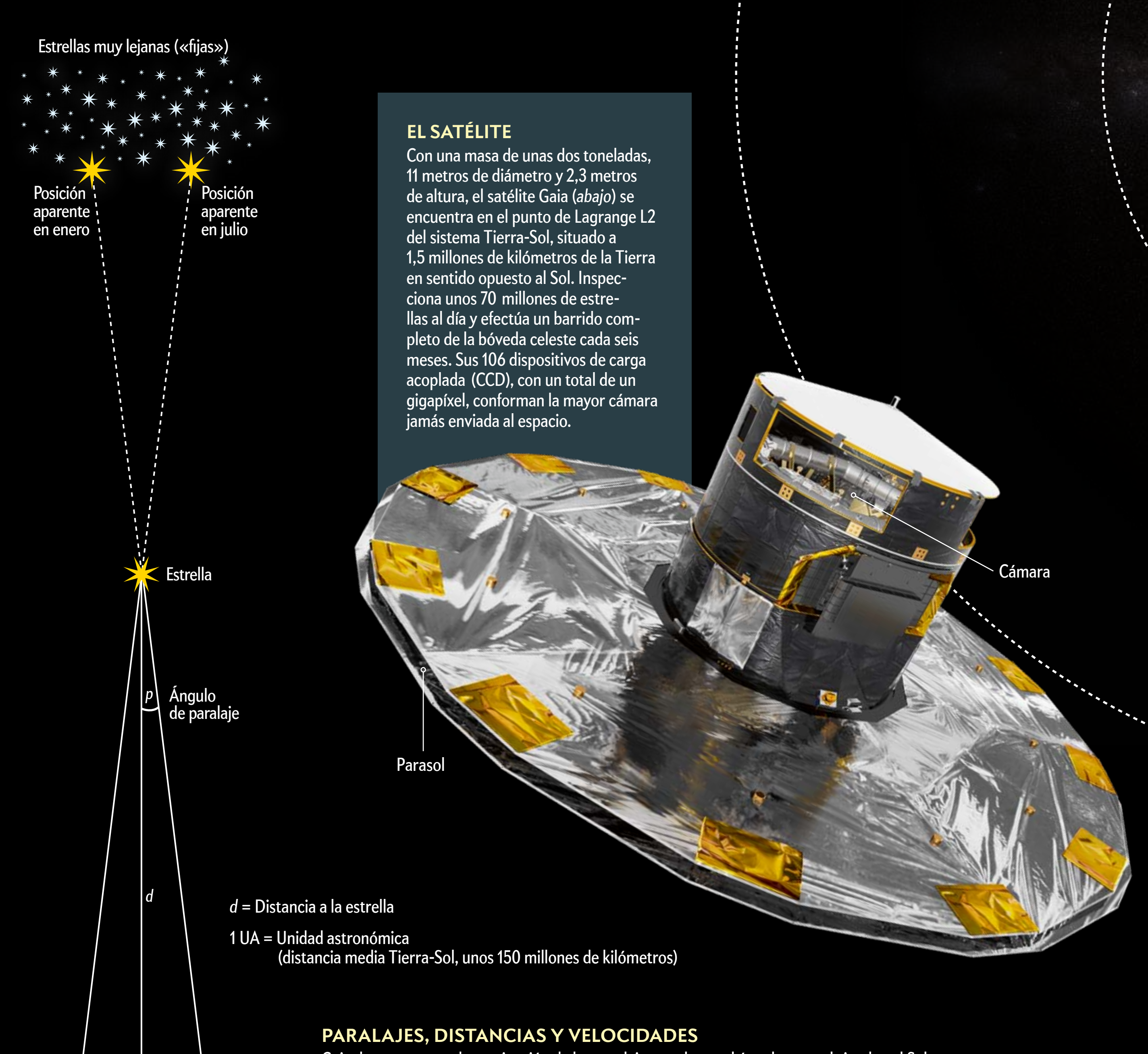
Para ilustrar la relevancia de Gaia, baste mencionar que, hasta la fecha, todas las determinaciones de distancias a estrellas y galaxias, así como las asociadas al tamaño del universo visible, se basaban de manera directa o indirecta en un catálogo de 120.000 estrellas cartografiadas a principios de los años noventa por el satélite Hipparcos, también de la ESA y precursor de Gaia. Gaia ha elevado esa cifra a más de mil millones y ha mejorado de manera espectacular la precisión de las medidas.

Hasta ahora, el consorcio ha publicado dos catálogos estelares. El primero se dio a conocer en septiembre de 2016 e incluía la posición, la distancia y el movimiento sobre la bóveda celeste de dos millones de estrellas. El segundo se publicó el 25 de abril de 2018 y elevó esa cantidad a 1330 millones. Además, incluía el brillo de 1600 millones de estrellas, el color de 1400 millones, los parámetros físicos de cientos de millones de ellas y la velocidad radial de 7 millones. A lo anterior hay que añadir medio millón de curvas de luz (mediciones del brillo en función del tiempo) de estrellas variables, así como la información relativa a las órbitas de 14.000 asteroides preseleccionados. Esa ingente cantidad de datos supera en varios órdenes de magnitud la de cualquier catálogo astrométrico previo.

Un aspecto clave de las mediciones de Gaia reside en sus determinaciones de las paralajes estelares. La paralaje de una estrella corresponde a la separación angular que subtienden el Sol y la Tierra tal y como se verían desde dicha estrella. Puede obtenerse midiendo la posición aparente del astro cuando la Tierra se halla en puntos opuestos de su órbita alrededor del Sol, y se encuentra directamente relacionada con la distancia al objeto (cuanto más lejos se encuentre, menor será su paralaje). El éxito sin precedentes del catálogo de Gaia no solo se debe al gran número de estrellas estudiadas, sino también a la precisión de sus medidas. En el caso de la paralaje, esta va de los 0,04 milisegundos de arco para las estrellas más brillantes (un ángulo similar al que subtendería una moneda de un euro situada en la Luna si la viésemos desde la Tierra) a los 0,7 milisegundos de arco para los

Cartografía estelar sin precedentes

El satélite Gaia fue diseñado por la ESA para medir la posición, el movimiento y las propiedades físicas y químicas de las estrellas de la Vía Láctea. A partir de esos datos, los científicos han comenzado a reconstruir el pasado de la galaxia y los procesos de evolución estelar como nunca antes en la historia de la astronomía. En abril del año pasado, el consorcio Gaia hizo público un catálogo estelar con las características de más de 1300 millones de estrellas. El análisis de esos datos mantendrá ocupados a los astrónomos durante décadas.



EL SATÉLITE

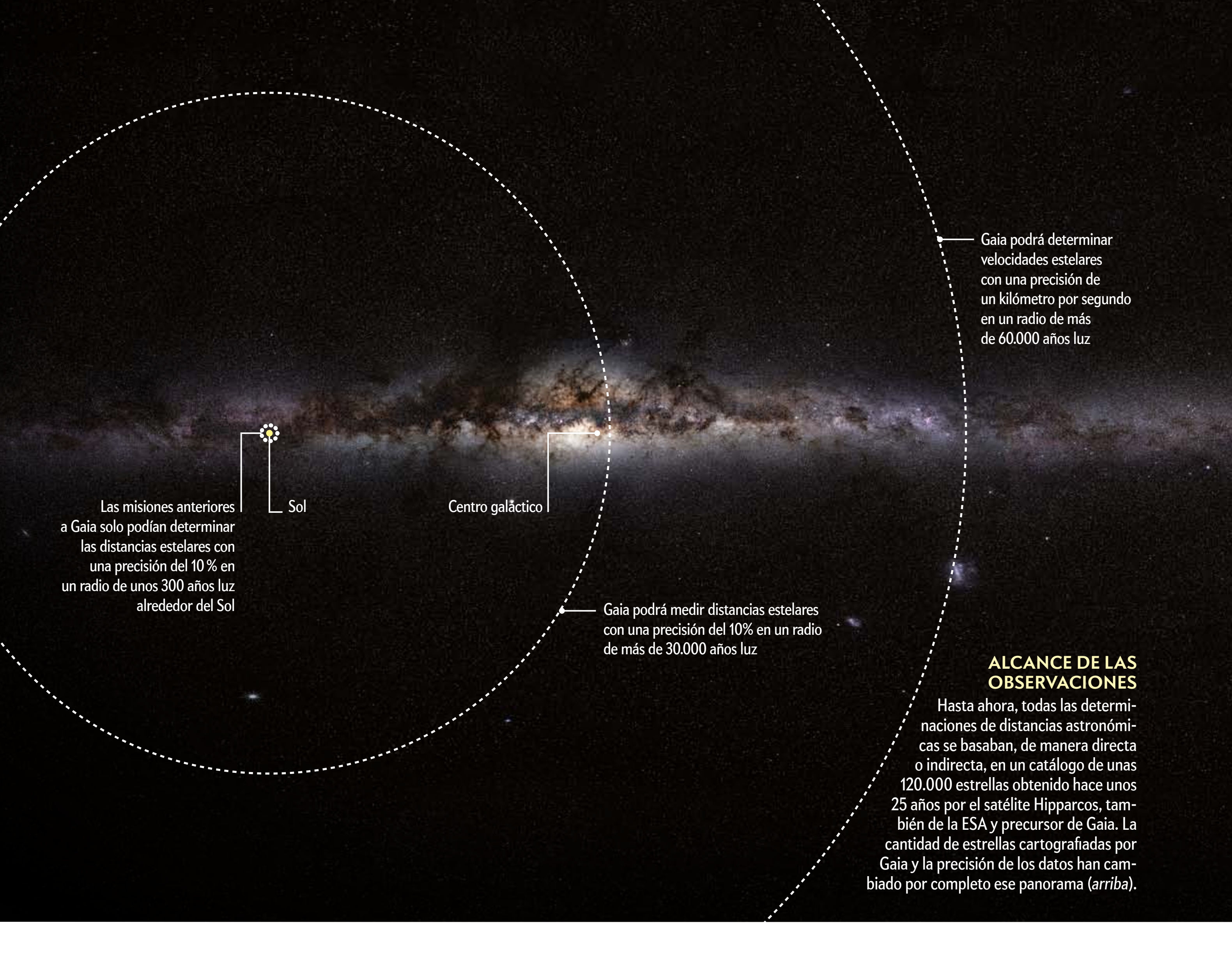
Con una masa de unas dos toneladas, 11 metros de diámetro y 2,3 metros de altura, el satélite Gaia (*abajo*) se encuentra en el punto de Lagrange L2 del sistema Tierra-Sol, situado a 1,5 millones de kilómetros de la Tierra en sentido opuesto al Sol. Inspecciona unos 70 millones de estrellas al día y efectúa un barrido completo de la bóveda celeste cada seis meses. Sus 106 dispositivos de carga acoplada (CCD), con un total de un gigapíxel, conforman la mayor cámara jamás enviada al espacio.

d = Distancia a la estrella

1 UA = Unidad astronómica (distancia media Tierra-Sol, unos 150 millones de kilómetros)

PARALAJES, DISTANCIAS Y VELOCIDADES

Gaia destaca por su determinación de las paralajes estelares: el ángulo que subtienden el Sol y la Tierra según se verían desde una estrella dada (*izquierda*). A partir de él, un ejercicio elemental de trigonometría permite calcular la distancia al astro. Con respecto a las misiones precedentes, Gaia ha llegado a multiplicar por varias decenas la precisión en la determinación de este parámetro. Al mismo tiempo, la posibilidad de observar una estrella durante largos períodos de tiempo permite deducir su movimiento a lo largo de la bóveda celeste. Su velocidad a lo largo de la línea de visión puede obtenerse a partir de un análisis del espectro electromagnético del astro gracias al efecto Doppler.



ALCANCE DE LAS OBSERVACIONES

Hasta ahora, todas las determinaciones de distancias astronómicas se basaban, de manera directa o indirecta, en un catálogo de unas 120.000 estrellas obtenido hace unos 25 años por el satélite Hipparcos, también de la ESA y precursor de Gaia. La cantidad de estrellas cartografiadas por Gaia y la precisión de los datos han cambiado por completo ese panorama (*arriba*).

ESA/ATG MEDIALAB (*satélite, recreación artística*); ESO/S. BRUNIER (*plano de la Vía Láctea*); CSIRO (*fuente diagrama paralaje*); ESA (*fuente diagrama alcance observaciones*); ADAPTADO DE «EUROPE'S STAR POWER, DEVIN POWELL EN NATURE, VOL. 502, OCTUBRE DE 2013 (*diagramas*)

astros más tenues. En comparación, las paralajes del catálogo de Hipparcos alcanzaban una precisión de 1 milisegundo de arco. Sin duda, hay un antes y un después de la misión Gaia.

EL PASADO DE NUESTRA GALAXIA

La imagen que tenemos de la Vía Láctea es la de una galaxia espiral, con un gran disco de estrellas en rotación rodeado por un halo difuso de estrellas más antiguas. Ese halo se distribuye de forma aproximadamente esférica alrededor del bulbo, la acumulación densa de estrellas que ocupa la parte central de la galaxia. En lo que respecta a su formación, en los últimos años se han descubierto varios indicios de que, a lo largo de su historia, la Vía Láctea sufrió múltiples interacciones con otras galaxias menores que modificaron su estructura.

Como mencionábamos al principio, las interacciones entre galaxias dejan una impronta en el movimiento de las estrellas. Por otro lado, cabe pensar que si dos grupos de estrellas tienen orígenes distintos, exhibirán también diferencias en su composición química. Este tipo de análisis químico-dinámico fue llevado a cabo el año pasado por un equipo liderado por la astrónoma Amina Helmi, de la Universidad de Groninga. Gracias al segundo catálogo de Gaia, los investigadores identificaron un grupo de estrellas cercanas al Sol que, sin embargo, mostraban una composición química distinta y giraban en torno al centro de la galaxia en sentido contrario al de nuestra estrella.

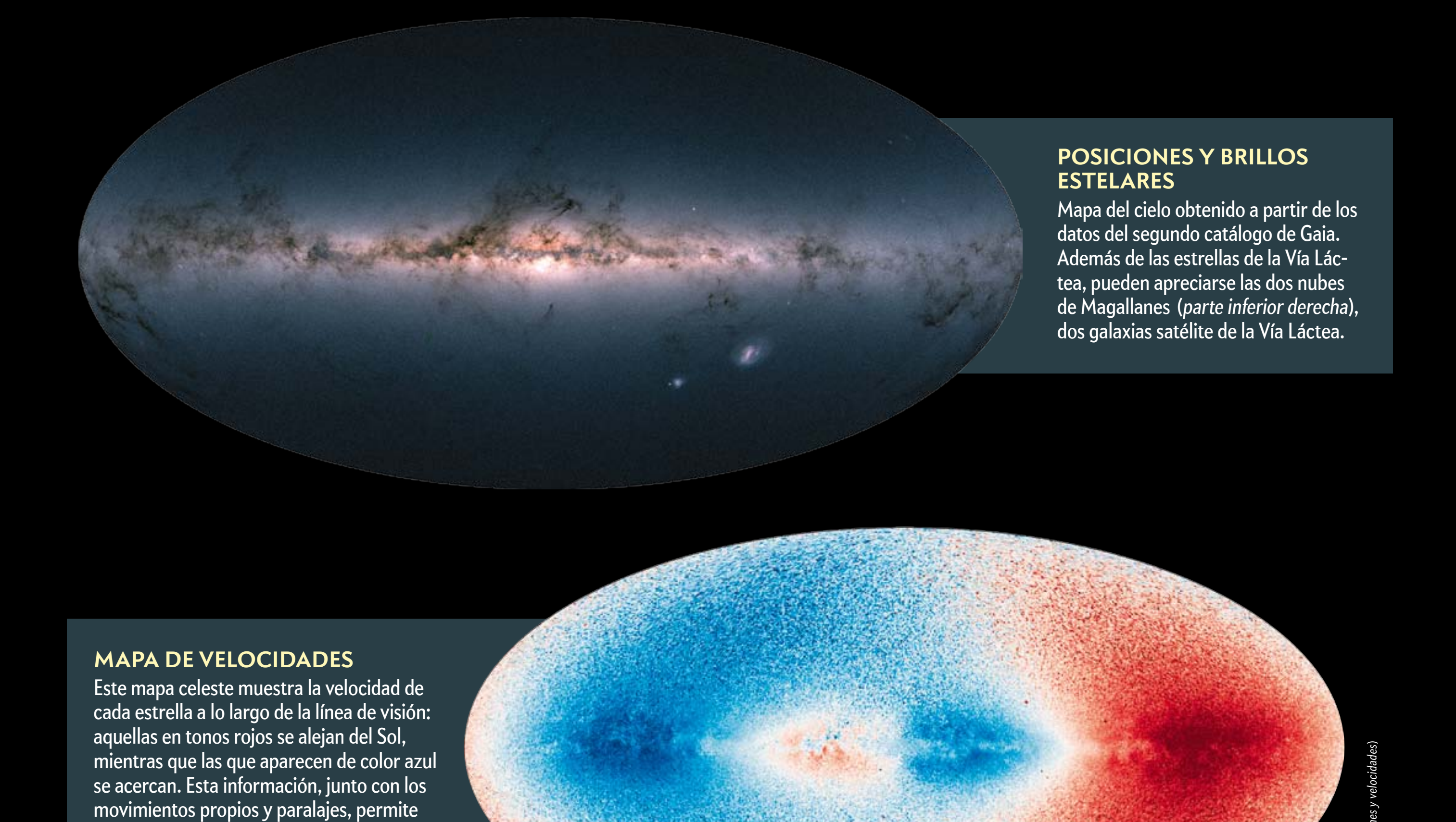
Esas diferencias pueden explicarse si suponemos que se trata de estrellas procedentes de otra galaxia que, en el pasado, acabó impactando contra la Vía Láctea. A partir de los datos de Gaia, los modelos teóricos de interacciones entre galaxias permiten reconstruir las características de la galaxia que chocó contra la nuestra y cuándo se produjo esa colisión. En su trabajo, Helmi y sus colaboradores concluyeron que, hace unos 10.000 millones de años (cuando el universo contaba la cuarta parte de su edad actual), una galaxia unas cuatro veces menos masiva que la Vía Láctea impactó contra ella. Los investigadores bautizaron dicha galaxia con el nombre de Gaia-Encélado.

La fusión de la Vía Láctea con Gaia-Encélado parece haber sido uno de los acontecimientos más importantes en la historia de nuestra galaxia. Pero, evidentemente, no ha sido el único. Consideremos ahora qué hubiera ocurrido si, en el pasado, una pequeña galaxia hubiese cruzado el disco de la Vía Láctea. Un encuentro así produciría un efecto local, arrastrando las estrellas del disco fuera de este pero sin expulsarlas del todo, dado que tenderían a volver hacia él atraídas por su gravedad. Las estrellas perturbadas adquirirían así un movimiento oscilatorio en la dirección perpendicular al plano galáctico, al tiempo que continuarían orbitando alrededor del centro de la galaxia. ¿Podemos reconocer en la actualidad la huella de un encuentro como el descrito?

EXPLORACIÓN GALÁCTICA

Presente y pasado de la Vía Láctea

En el pasado, la Vía Láctea fue creciendo al fusionarse sucesivamente con galaxias menores. Esas interacciones pueden reconocerse hoy a partir de las propiedades de las estrellas, ya que los astros procedentes de una galaxia de poco tamaño que en su día fue engullida por la Vía Láctea presentarán en la actualidad movimientos y características comunes. Gracias a los mapas de posiciones y velocidades estelares elaborados por Gaia (*abajo*), los astrónomos están comenzando a reconstruir numerosos detalles de la historia de nuestra galaxia (*página opuesta*).



POSICIONES Y BRILLOS ESTELARES

Mapa del cielo obtenido a partir de los datos del segundo catálogo de Gaia. Además de las estrellas de la Vía Láctea, pueden apreciarse las dos nubes de Magallanes (*parte inferior derecha*), dos galaxias satélite de la Vía Láctea.

MAPA DE VELOCIDADES

Este mapa celeste muestra la velocidad de cada estrella a lo largo de la línea de visión: aquellas en tonos rojos se alejan del Sol, mientras que las que aparecen de color azul se acercan. Esta información, junto con los movimientos propios y paralajes, permite reconstruir los movimientos de rotación de las estrellas en torno al centro de la galaxia.

ESA/GAIA/DPAC (*mapas de posiciones y velocidades*)

Con los datos de Gaia, la respuesta es afirmativa. Así lo puso de manifiesto un estudio publicado el año pasado y liderado por Teresa Antoja, del Instituto de Ciencias del Cosmos de la Universidad de Barcelona. Los investigadores analizaron las posiciones y las velocidades de casi un millón de estrellas del entorno solar; en particular, la dependencia de la velocidad perpendicular al plano de la galaxia con respecto a la distancia a dicho plano. Al comparar los datos con las simulaciones, estos se mostraron compatibles con una interacción galáctica como la descrita, la cual habría ocurrido hace unos 500 millones de años. Esa datación coincide con el último paso de la galaxia de Sagitario (una de las galaxias enanas cercanas a la Vía Láctea) por el punto de su órbita más cercano al centro de la Vía Láctea. En este sentido, los datos de Gaia revelan que la dinámica del disco galáctico es mucho más compleja de lo que suponíamos y que los modelos actuales precisan una profunda revisión.

Otro aspecto en el que los datos de Gaia han mostrado un gran potencial es el relativo al estudio de los cúmulos estelares, agrupaciones de estrellas que se han formado a partir de una misma nube de gas y polvo. Como consecuencia de ese origen común, las estrellas de un cúmulo comparten edad y composición química inicial, así como un movimiento común en el espacio, el cual refleja el desplazamiento de la nube original. Sin embargo, cuando miramos al cielo, las estrellas de un cúmulo se nos aparecen superpuestas a otras estrellas «de campo», las cuales se encuentran por delante o por detrás del cúmulo. Solo la coincidencia de movimientos y paralajes puede discernir qué estrellas pertenecen a un cúmulo y cuáles no.

CANIBALISMO GALÁCTICO

Las simulaciones por ordenador permiten inferir los movimientos que deberían seguir a lo largo del tiempo (*1-5*) las estrellas de dos galaxias que colisionan (*azul y rojo*) . Sumado a los datos empíricos de Gaia, este tipo de análisis está permitiendo reconstruir el pasado de la Vía Láctea. Por ejemplo, un estudio reciente ha revelado que, hace unos 10.000 millones de años, la Vía Láctea engulló una galaxia unas cuatro veces menos masiva, bautizada Gaia-Encélado por los investigadores.

1 2 3 4 5

MERGER IN THE EARLY FORMATION STAGES OF OUR GALAXY, WWW.YOUTUBE.COM/WATCH?V=HVPZHATLDKY, ESA SCIENCE & TECHNOLOGY/KOPPELMAN/VILLALOBOS/HELMI/INSTITUTO ASTRONÓMICO KAPTEYN/UNIVERSIDAD DE GRONINGA (*colisión de galaxias*); «A DYNAMICALLY YOUNG AND PERTURBED MILKY WAY DISK», TERESA ANTOJA ET AL. EN NATURE, VOL. 561, SEPTIEMBRE DE 2018 (*diagrama de fases del disco galáctico*)

V_z (kilómetros por segundo)

60 40 20 0 −20 −40 −60

−1 −0,5 0 0,5 1

Z (kilopársecs)

DINÁMICA COMPLEJA

El análisis de la distancia al plano galáctico (*Z*) frente a la velocidad con respecto a dicho plano (V_Z) para múltiples estrellas (*colores*) presenta una clara estructura en espiral. Este patrón ha sugerido que, hace unos 500 millones de años, una galaxia enana atravesó el disco de la Vía Láctea.

Diversos equipos han utilizado esta idea para buscar grupos de estrellas con un comportamiento común. La precisión de los datos de Gaia ha permitido hallar decenas de cúmulos nuevos. Al mismo tiempo, el análisis de todos los cúmulos ya conocidos (unos 3000) ha revelado que muchos de ellos eran más extensos de lo que se creía y que, por otro lado, algunos no eran verdaderos cúmulos, sino simples asterismos (agrupaciones de estrellas sin un vínculo físico entre ellas). Tal ha sido el caso de los «cúmulos» situados en la parte interna del disco galáctico y con edades avanzadas. De acuerdo con los modelos teóricos, semejantes cúmulos deberían disgregarse con rapidez, por lo que su existencia ponía en entredicho los modelos. Ahora, Gaia ha demostrado que, en realidad, esos supuestos cúmulos no eran tales.

FÍSICA ESTELAR

Aunque el objetivo principal de la misión Gaia es desentrañar el pasado de la galaxia, sus resultados van más allá. En particular, la exuberancia de datos del último catálogo está llenando numerosos huecos en nuestro conocimiento sobre la estructura y la evolución de las estrellas.

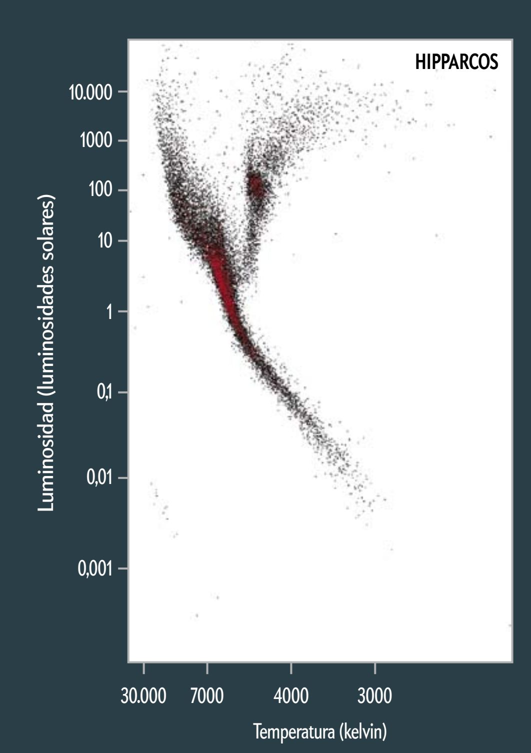
Una de las herramientas más importantes en el estudio de la física estelar es el diagrama Hertzsprung-Russell (HR). Concebido hace algo más de un siglo por el astrónomo danés Ejnar Hertzsprung y, de manera independiente, por el estadounidense Henry Norris Russell, en él se representa la relación empírica entre la temperatura y la luminosidad de las estrellas, dos magnitudes que van cambiado desde el nacimiento hasta la muerte de un astro [*descargue gratis un póster del diagrama en* «Cómo

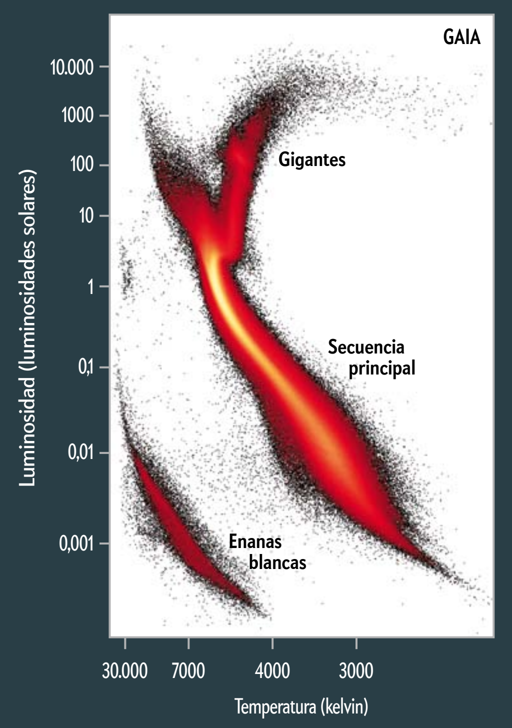
Una nueva mirada a la vida de las estrellas

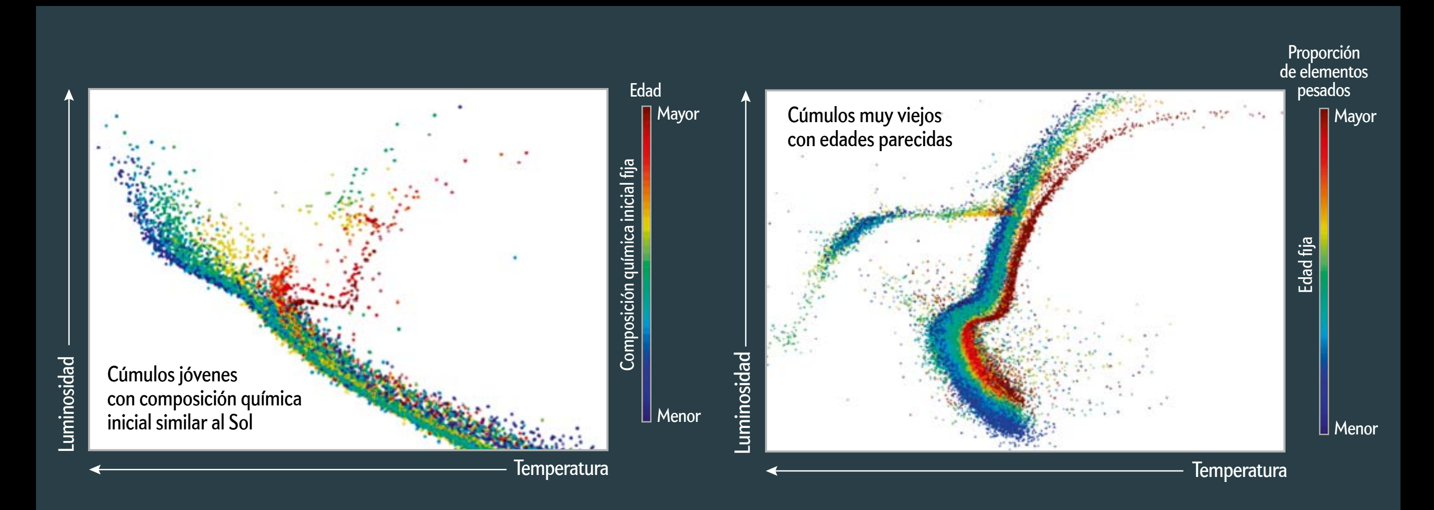
Gaia también está transformando nuestro conocimiento sobre la evolución de las estrellas. Una de las herramientas principales en física estelar es el diagrama de Hertzsprung-Russell: la relación empírica entre la luminosidad de una estrella y su temperatura. A partir de él, los astrónomos pueden poner a prueba los modelos de evolución estelar. La enorme cantidad de estrellas estudiadas por Gaia ha permitido reconstruir el diagrama de Hertzsprung-Russell con un detalle nunca antes alcanzado (*arriba*). Ello ya ha revelado la existencia de algunas poblaciones estelares hasta ahora insospechadas y ha permitido analizar por separado un gran número de los cúmulos estelares conocidos (*abajo*).

EL MAYOR CENSO ESTELAR DE LA HISTORIA DE LA ASTRONOMÍA

Gaia ha elaborado un diagrama de Hertzsprung-Russell con los datos empíricos de 4.276.690 estrellas (*derecha*). La escala de color representa la cantidad de estrellas identificadas en cada zona del diagrama (*de menor a mayor: negro, rojo, naranja, amarillo*). En la rama de las enanas blancas, la subestructura del nuevo diagrama ha revelado la existencia de una población estelar hasta ahora desconocida, con una masa de unas 0,8 masas solares. En comparación, el diagrama de Hertzsprung-Russell obtenido en su día por la misión Hipparcos (*izquierda*) se basaba en un censo de unas 20.000 estrellas.







CÚMULOS ESTELARES

Un cúmulo estelar es una agrupación de estrellas formadas a partir de una misma nube de gas y polvo, por lo que todas ellas comparten edad y composición química inicial. Por primera vez, Gaia ha permitido obtener diagramas empíricos y precisos para multitud de cúmulos. Estos pueden representarse en función de su edad (*izquierda*) o en función de su composición química inicial (*derecha*). Estas series de datos, nunca antes obtenidas, están ofreciendo una posibilidad hasta ahora inexplorada para mejorar los modelos de estructura y evolución de las estrellas.

usar el diagrama de Hertzsprung-Russell», por Ken Croswell; Investigación y Ciencia, septiembre de 2011]. Cuando observamos una estrella y medimos sus propiedades, su posición en el diagrama de HR viene dada principalmente por su edad, por un lado, y por su masa y composición química iniciales, por otro. Sin embargo, hasta ahora solo disponíamos de datos parciales en algunas etapas de la vida de las estrellas, correspondientes a zonas concretas del diagrama de HR. Gaia ha cambiado por completo esta situación. Las distancias estelares medidas por el satélite permiten transformar las magnitudes aparentes (los brillos que observamos desde la Tierra) en absolutas (sus luminosidades intrínsecas). Como consecuencia, podemos situar las estrellas en el diagrama con tal precisión que hemos empezado a ver detalles que nunca antes habíamos apreciado.

Los datos de Gaia han permitido componer un diagrama de HR con más de cuatro millones de estrellas, aquellas para las que se dispone de datos más precisos. En comparación, el elaborado en su día a partir de los datos de Hipparcos incluía las propiedades de unas 20.000. Los nuevos datos revelan con gran claridad diversas poblaciones estelares, entre las que destacan las estrellas de la secuencia principal (aquellas que, como el Sol, aún están fusionando hidrógeno), las gigantes (que ya han alcanzado la etapa de fusión del helio) y las enanas blancas (residuos estelares compactos que quedan una vez que una estrella similar al Sol ha agotado el combustible nuclear).

Las enanas blancas son muy abundantes pero difíciles de detectar, ya que emiten muy poca luz. Su función de luminosidad (cuántas enanas blancas existen de cada luminosidad) y su función de masa (cuántas hay con una masa dada) proporcionan información sobre la historia de formación estelar en la galaxia [*véase* «La edad de las enanas blancas», por Enrique García Berro; Investigación y Ciencia, abril de 2011]. Hasta ahora, los estudios mostraban una clara concentración de enanas blancas con 0,6 masas solares, así como un pico de ellas con 0,4 masas solares. Sin embargo, el diagrama de HR obtenido por Gaia apunta a la existencia de una población no predicha hasta ahora por los modelos y que rondaría las 0,8 masas solares. Por el momento, esta subpoblación de enanas blancas descubierta por Gaia carece de una explicación satisfactoria.

Ya hemos mencionado que las estrellas de un cúmulo, por tratarse de objetos con un origen común, comparten edad y composición química inicial. Al mismo tiempo, cada una de ellas evoluciona al ritmo marcado por su masa. Si representamos la temperatura y la luminosidad de todas las estrellas pertenecientes a un mismo cúmulo en un diagrama de HR, obtenemos una «isócrona»: una instantánea de las propiedades de un conjunto de estrellas de la misma edad. Por tanto, al comparar las isócronas de cúmulos de edades distintas, podemos contrastar los datos con los modelos de evolución estelar. Esta es la primera vez que disponemos de isócronas empíricas y precisas para multitud de cúmulos. Sin duda, este valioso material proporcionará interesantes mejoras en los modelos de estructura y evolución de las estrellas.

MÁS ALLÁ DE LA VÍA LÁCTEA

Los datos de Gaia son también un tesoro para el estudio del halo externo y de la vecindad de la galaxia. El análisis de las estrellas en aproximadamente la mitad de los cúmulos globulares (agrupaciones de estrellas que orbitan alrededor del centro galáctico), en todas las galaxias esferoidales vecinas conocidas y en las nubes de Magallanes (dos galaxias satélite de la Vía Láctea) ha permitido derivar sus movimientos con mayor precisión que nunca, a pesar de los efectos sistemáticos que existen en los datos.

El estudio de las sobredensidades estelares en el halo externo revela, por primera vez, un mapa cinemático y estructural de las corrientes estelares de la Vía Láctea en todo el cielo. Existe una rica red de corrientes entrecruzadas, a menudo con una sorprendente coherencia cinemática. Varias de estas estructuras constituyen nuevos descubrimientos. Este mapa apoya firmemente el escenario de que la Vía Láctea experimentó un número significativo de eventos de fusión y acreción de galaxias menores.

Las órbitas de las galaxias esferoidales enanas vecinas no comparten el mismo plano orbital, aunque todas muestran una gran inclinación con respecto al disco galáctico. Se ha observado la existencia de asimetrías y, posiblemente, efectos de marea en algunas de ellas. El análisis de los movimientos de estas galaxias satélite permite también estimar la masa de la Vía Láctea. Por ejemplo, si suponemos que la galaxia enana Leo I se encuentra ligada gravitacionalmente a la nuestra, podemos derivar una masa de la Vía Láctea de unas $9{,}1\cdot10^{11}$ masas solares.

¿Qué nos depara el futuro? La duración de la misión estaba prevista en cinco años, hasta julio de 2019, con una posible extensión de un año. Sin embargo, el uso de combustible a bordo se ha mostrado muy eficiente, así como también lo fue la inyección en órbita. Hoy se prevé que el combustible se agote en 2024, por lo que la ESA ha aprobado ya extender la misión hasta finales de 2020 y está considerando la posibilidad de alargarla otros dos años más. Observar una estrella durante un período de tiempo más largo permite mejorar la determinación de su movimiento. Además, hace posible detectar las desviaciones con respecto a una trayectoria rectilínea. En tal caso, ello indicaría que la estrella no se encuentra aislada, sino acompañada por otro objeto, ya se trate de otra estrella o de un planeta.

Mientras la comunidad científica sigue analizando los datos del segundo catálogo de Gaia, el satélite continúa con sus observaciones diarias. La próxima entrega de datos está prevista para 2020. Dicho catálogo mejorará los datos del actual e incluirá información nueva: la clasificación de algunos de los objetos observados en estrellas, galaxias y cuásares; las temperaturas, gravedades, composición química y otras propiedades de multiplicidad de las estrellas; así como las órbitas precisas de los cuerpos del sistema solar. La comunidad astronómica puede estar de enhorabuena: el conjunto de datos de Gaia de este archivo y de los venideros la mantendrá ocupada durante décadas.

PARA SABER MÁS

A dynamically young and perturbed Milky Way disk. Teresa Antoja et al. en *Nature*, vol. 561, págs. 360-362, septiembre de 2018.
The merger that led to the formation of the Milky Way's inner stellar halo and thick disk. Amina Helmi et al. en *Nature*, vol. 563, págs. 85-88, octubre de 2018.
Información sobre el segundo catálogo de Gaia: **www.cosmos.esa.int/web/gaia/data-release-2**
Archivo de la misión Gaia: **gea.esac.esa.int/archive**

EN NUESTRO ARCHIVO

La tabla periódica de las estrellas. Ken Croswell en *IyC*, septiembre de 2011.
Los fósiles de la Vía Láctea. Kathryn V. Johnston en *IyC*, febrero de 2015.
La misión Gaia y la historia de nuestra galaxia. Carme Jordi y Eduard Masana en *IyC*, abril de 2017.

PÁGINA ANTERIOR: ESA/GAIA/DPAC; ESA/HIPPARCOS (*diagrama HR Hipparcos*); ESA/GAIA/DPAC (*diagrama HR Gaia*); ESA/GAIA/DPAC Y «GAIA DATA RELEASE 2: OBSERVATIONAL HERTZSPRUNG-RUSSELL DIAGRAMS» C. BABUSIAUX ET AL., ASTRONOMY & ASTROPHYSICS, VOL. 616, JULIO DE 2018 (*diagramas cúmulos*)





BIOLOGÍA EVOLUTIVA

ACTIVIDAD FÍSICA: UNA NECESIDAD FISIOLÓGICA

A diferencia de nuestros parientes simios, los humanos necesitamos realizar ejercicio para estar sanos

Herman Pontzer

Ilustración de Bryan Christie

Herman Pontzer es profesor de antropología evolutiva en la Universidad Duke. Estudia el modo en que la evolución ha moldeado la fisiología y la salud humanas.



Hace veinte años, inmerso en la humedad crepuscular de un bosque tropical de Uganda, atisbaba a un grupo de ocho chimpancés que dormían en las espesas copas de los árboles. Los tres científicos y los dos ayudantes de campo que componíamos el grupo de investigación nos habíamos levantado una hora antes, calzado las botas de agua y empacado las mochilas a toda prisa para caminar por senderos cenagosos a la luz de sendas luces frontales. Al llegar a nuestro destino, las apagamos y nos quedamos quietos y en silencio, sumergidos en un oscuro océano de bosque cuya superficie se alzaba a unos treinta metros de nosotros, escuchando a los chimpancés respirar y cambiar de postura mientras dormían en sus lechos de hojas.

Por entonces era un joven doctorando que estudiaba la evolución de los humanos y los simios, y me había desplazado al Parque Nacional de Kibale para medir cuánto trepan cada día los chimpancés. Me parecía que toda esa energía gastada en las ascensiones podría ser un factor crítico en la ecología y la evolución de la especie, que habría moldeado su anatomía para maximizar la eficiencia a la hora de trepar y ahorrar calorías para la reproducción y otras funciones esenciales. Meses atrás, mientras planificaba la investigación del siguiente verano desde la comodidad de mi escritorio en la Universidad Harvard, me imaginé a los chimpancés librando una dura batalla por la existencia, esforzándose cada día para salir adelante. Pero al sumergirme en el ritmo del trabajo de campo, siguiendo a los chimpancés de sol a sol, llegué a una conclusión muy diferente: los chimpancés son perezosos. Y solo hace poco he comprendido lo que la holgazanería de los simios nos cuenta sobre la evolución humana.

Nos sentimos atraídos por los simios porque nos vemos reflejados en ellos en muchos aspectos. No es solo porque compartamos más del 97 por ciento de nuestro ADN con orangutanes, gorilas, chimpancés y bonobos. Los simios son listos, utilizan herramientas, luchan, se acicalan y se escabullen para tener sexo. Algunos matan a sus vecinos por el territorio y cazan a otras especies para alimentarse. Las crías aprenden de sus madres, luchan y juegan entre sí, y tienen berrinches. Y cuanto más retrocedemos en el registro fósil, más se parecen nuestros antepasados a los simios. Ninguna especie actual es un modelo perfecto del pasado, puesto que todos los linajes cambian con el tiempo. Pero los simios de hoy nos proporcionan una gran oportunidad para ver de dónde venimos y para entender cuánto de nosotros es ancestral y no ha variado.

Y, sin embargo, son las diferencias existentes entre humanos y simios, más que sus similitudes, las que nos están aportando nuevas pistas sobre cómo funciona nuestro organismo. Los descubrimientos procedentes de excavaciones fósiles, zoológicos y laboratorios de todo el mundo están mostrándonos el cambio radical que exhibió nuestro cuerpo en los últimos dos millones de años. Durante décadas, los investigadores han sabido que este último capítulo de nuestra evolución ha estado marcado por importantes transformaciones anatómicas y ecológicas, como el gran aumento del tamaño cerebral, la aparición de la caza y la recolección y el uso de herramientas cada vez más complejas, así como el incremento del tamaño corporal. Pero, en general, han dado por supuesto que tales cambios habían afectado a la forma y al comportamiento, no a la función básica de nuestras células. Los avances actuales están contradiciendo ese punto de vista al demostrar que hemos experimentado también modificaciones fisiológicas. A diferencia de nuestros parientes simios, hemos desarrollado una dependencia de la actividad física: debemos movernos para sobrevivir.

PARAÍSO PERDIDO

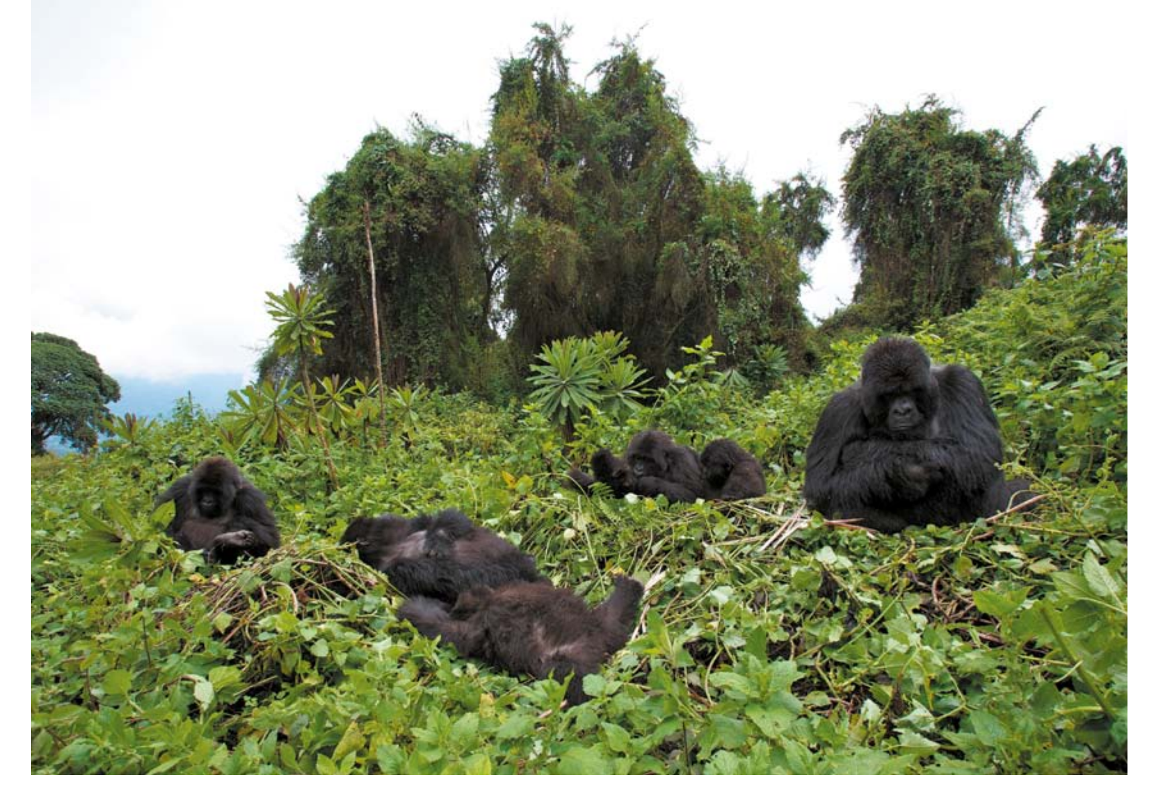
Para un chimpancé, un día típico en la selva es parecido al que pasa cualquier jubilado apático en un crucero por el Caribe, aunque con menos actividades organizadas. Se levanta temprano, al romper el alba, y después desayuna (fruta). Come hasta saciarse y luego busca un lugar agradable en el que echarse una siesta, y tal vez se acicale un poco. Pasada una hora, más o menos —¡no hay prisas!—, busca algún árbol soleado repleto de higos y se atiborra. Puede que vaya a ver a algunos amigos, se acicala un poco más y se echa otra siesta. Cena temprano, hacia las cinco (más fruta, puede que también algunas hojas), y luego busca un árbol agradable en el que dormir, preparar un nido y así dar por acabado el día. Seguro que se organiza una algarabía cuando la fruta está realmente buena, o durante las

EN SÍNTESIS

Nuestros parientes vivos más cercanos, los grandes simios, suelen realizar muy poca actividad física. Sin embargo, ello no les acarrea problemas de salud.

Los humanos hemos evolucionado de tal forma que necesitamos hacer mucho más ejercicio para estar sanos.

Las nuevas investigaciones revelan que, igual que la anatomía y el comportamiento humanos evolucionaron durante los dos últimos millones de años, también lo hizo nuestra fisiología. Esta se adaptó a la actividad física intensa que exigen la caza y la recolección.



HOLGAZANEANDO: Una familia de gorilas de montaña se relaja en Ruanda. Los grandes simios se mantienen sanos con muy poca actividad física.

DAVID CAYLESS, GETTY IMAGES

ocasionales persecuciones o cacerías de monos; además, el macho alfa necesita sacar algo de tiempo cada día para golpear a un par de víctimas o para hacer una demostración de fuerza. Pero, por regla general, la vida del chimpancé es bastante sosegada.

Y no solo se trata de los chimpancés. Orangutanes, gorilas y bonobos también llevan una vida aparentemente ociosa, esa clase de vida contra la que te advierten las fábulas para niños y los programas para prevenir el consumo de drogas de la escuela secundaria. Los grandes simios pasan de ocho a diez horas al día descansando, acicalándose y comiendo antes de retirarse por la tarde para dormir de nueve a diez horas cada noche. Los chimpancés y los bonobos caminan unos tres kilómetros cada día, y los gorilas y los orangutanes recorren incluso menos distancia. ¿Y trepar? Como descubrí ese verano, los chimpancés ascienden unos cien metros al día, el equivalente calórico de un kilómetro y medio caminando. La distancia total trepada por los orangutanes es parecida, mientras que los ascensos de los gorilas sin duda suman menos, aunque todavía no se han medido.

En los humanos, esa escasa actividad sería la fórmula casi segura para padecer problemas graves de salud. Andar menos de 10.000 pasos diarios se asocia a un mayor riesgo de enfermedades cardiovasculares y metabólicas. Los adultos estadounidenses dan unos 5000 pasos de media, lo que contribuye a unos índices alarmantes de diabetes de tipo 2 (que afecta a uno de cada diez estadounidenses) y a la proliferación de enfermedades cardíacas, responsables de una cuarta parte de todas las muertes en el país. A la luz de estos hechos, los simios deberían tener problemas serios. Si se convierte el esfuerzo que dedican a caminar y trepar en pasos por día, para realizar una comparación entre especies, vemos que los grandes simios apenas alcanzan las cifras más modestas de los humanos sedentarios y nunca llegan a la marca de referencia de 10.000 pasos por día.

Luego está todo ese tiempo que pasan sentados y descansando. En los humanos, estar sentado frente al escritorio o la televisión durante períodos prolongados de tiempo se asocia a un mayor riesgo de enfermedades y a una menor esperanza de vida, incluso entre las personas que hacen ejercicio. En todo el mundo, se considera que la inactividad física supone un riesgo para la salud similar al del tabaquismo, y se calcula que causa la muerte de más de cinco millones de personas cada año. Entre los escoceses adultos, los que ven la televisión más de dos horas al día tienen un 125 por ciento más de posibilidades de sufrir algún episodio cardiovascular, como un infarto de miocardio o un ictus. Un estudio con adultos australianos dio como resultado que cada hora frente a la televisión acortaba la esperanza de vida 22 minutos. Le ahorraré la operación matemática: un maratón de las 63 horas y media de *Juego de tronos* le costará un día de vida en este planeta.

Sin embargo, los chimpancés y otros simios se mantienen sorprendentemente sanos a pesar de su reducida actividad física. Incluso en cautividad casi nunca sufren diabetes, y su presión arterial no aumenta con la edad. A pesar de presentar niveles de colesterol altos por naturaleza, las arterias de los chimpancés ni se endurecen ni se atascan; como consecuencia, no padecen cardiopatías como las humanas ni sufren infartos de miocardio a causa de la oclusión de las arterias coronarias. Y se mantienen delgados. En 2016 trabajé con Steve Ross en el zoo de Lincoln Park de Chicago y con un equipo de colaboradores para medir la tasa metabólica y la composición corporal de simios de distintos zoos de Estados Unidos. Los resultados fueron reveladores: incluso en cautividad, los gorilas y los orangutanes acumulan solo un promedio de entre un 14 y un 23 por ciento de grasa corporal, y los chimpancés menos del 10 por ciento, unos valores similares a los de los atletas olímpicos.

Entre los primates, los humanos somos claramente la excepción. De algún modo, evolucionamos de tal forma que necesitamos realizar mucha más actividad física para que nuestro organismo funcione con normalidad. Estar sentados durante horas, acicalarse y sestear (o ver la televisión) han pasado de ser prácticas habituales a constituir un riesgo serio para la salud. ¿Cuándo pasamos de tener una existencia sencilla como la de nuestros compañeros simios a tener una vida mucho más activa y por qué? Los descubrimientos fósiles nos están ayudando a resolver este enigma.

RAMIFICACIONES

En el árbol genealógico de los primates, nuestra rama, la de los homininos, se separó de la de los chimpancés y los bonobos hace

unos seis o siete millones de años, cerca del final del período geológico conocido como Mioceno. Hasta hace poco, disponíamos de escasos fósiles de homininos de las primeras etapas de nuestro linaje. Pero durante la primera década de este siglo, se produjo una rápida sucesión de descubrimientos. Los paleoantropólogos que trabajaban en Chad, Kenia y Etiopía hallaron restos de tres homininos de ese período crítico: *Sahelanthropus*, *Orrorin* y *Ardipithecus*.

Esos tres homininos primitivos difieren de cualquier especie de simio actual en los rasgos anatómicos del cráneo, los dientes y el esqueleto. Sin embargo, aparte de caminar sobre dos extremidades, parece que vivieron de una forma bastante simiesca. Sus molares eran parecidos en tamaño y en su filo a los de los chimpancés, con un esmalte un poco más grueso, lo que sugiere una dieta mezclada de frutas y otros alimentos vegetales. *Ardipithecus*, el hominino primitivo más conocido, descubierto en yacimientos de Etiopía de 4,4 millones de años de antigüedad, tenía brazos largos, dedos largos y curvados y pies prensiles, lo que indica que una parte de su vida la pasaba en los árboles. Nuevos análisis bioquímicos realizados por mi estudiante de posgrado Elaine Kozma, de la Universidad de la Ciudad de Nueva York, muestran que *Ardipithecus* experimentó cambios en su anatomía pélvica que le permitieron caminar totalmente erguido y de forma eficiente, en términos de energía, sin que disminuyera su capacidad de adentrarse en las copas de los árboles. Nuestros primeros antepasados se sentían muy cómodos en ambos mundos, en el suelo y en los árboles.

Entre cuatro y dos millones de años atrás, el registro fósil de los homininos está dominado por el género *Australopithecus*, con al menos cinco especies reconocidas en la actualidad, incluida la famosa Lucy y su linaje. Los cambios anatómicos observados en los miembros inferiores de estas especies hacen pensar que mejoró su capacidad de caminar y que pasaba más tiempo en el suelo, en comparación con especies anteriores. El pie prensil está ausente en *Australopithecus*, el dedo gordo está alineado con los demás y las piernas son más largas, con la misma proporción entre la longitud de la pierna y la masa corporal que hoy presentamos los humanos. Los análisis de pelvis realizados por Kozma, junto al trabajo reciente sobre huellas fosilizadas en Laetoli, en Tanzania, indican que estos homininos tenían un andar realmente moderno. Sus brazos y dedos largos nos cuentan que seguían viviendo con regularidad en los árboles para buscar comida y puede que para dormir. Los análisis de las formas de desgaste de sus dientes sugieren que comían sobre todo alimentos vegetales, igual que los homininos más primitivos que ellos y que los simios actuales. Basándonos en sus grandes molares, con esmalte grueso, lo más probable es que también recurrieran a alimentos más duros y fibrosos, especialmente cuando escaseaban su comida preferida.

La aparición de la marcha erguida y bípeda en *Australopithecus* constituye un hecho importante, ya que supone una estrategia diferente a la hora de desplazarse por el entorno. Cubrir más terreno con menos gasto calórico debió de permitirles expandir su territorio y prosperar en hábitats menos productivos que aquellos en los que viven los simios actuales. Se observan otros rasgos notables e intrigantes en los fósiles, como la pérdida en los machos de los caninos grandes y afilados, lo que parece reflejar cambios en el comportamiento social. No obstante, la dieta herbívora y la conservación de las adaptaciones para trepar indican que su ecología basada en la recolección y su actividad diaria seguían siendo muy simiescas. Las distancias que recorrían cada día eran seguramente modestas, y debían de pasar mucho tiempo descansando y digiriendo sus atracones de plantas fibrosas. Es poco probable que llegasen a desplazarse 10.000 pasos por día.

Hace unos dos millones de años empezaron a aparecer homininos que experimentaban con nuevas ideas y estrategias, según muestran varios datos reveladores. En 2015, Sonia Harmand, de la Universidad de Stony Brook, y su equipo recuperaron herramientas de piedra grandes y difíciles de manejar, algunas de más de 13 kilogramos, en sedimentos de 3,3 millones de años de antigüedad en la costa occidental del lago Turkana, en Kenia. En los últimos 15 años, las excavaciones llevadas a cabo en yacimientos de Etiopía y Kenia de 2,6 millones de años de antigüedad pusieron al descubierto útiles de piedra junto con huesos fosilizados de animales que mostraban inequívocos arañazos y desperfectos relacionados con el tratamiento de la carne. Hace 1,8 millones de años, los huesos con marcas de cortes y las herramientas de piedra eran algo habitual, y no se trataba solo de animales enfermos y heridos que eran presa de esos homininos. El análisis de fragmentos óseos recuperados en la garganta de Olduvai, en Tanzania, indica que entre sus objetivos había ungulados jóvenes. Resulta igual de importante que, a diferencia de todos los homininos anteriores, los de hace 1,8 millones de años se expandieron de África a Eurasia y ocuparon desde las estribaciones de las montañas del Cáucaso hasta los bosques tropicales de Indonesia. Nuestros predecesores saltaron la barrera ecológica y lograron prosperar prácticamente en cualquier sitio.

Olvidemos las historias que relatan algún encuentro clandestino en el jardín del Edén o de Prometeo entregando el fuego. Fue este escarceo con piedras y carne y el desarrollo de una estrategia de caza y recolección durante millones de años lo que alejó a nuestro linaje de los demás simios y transformó el escenario de manera irreversible. Este trascendental cambio marcó nuestra evolución, con la aparición del género *Homo*.

INGREDIENTES PARA LA REFLEXIÓN

En ecología y evolución, la dieta marca el destino. Los alimentos que comen los animales no solo modelan sus dientes e intestinos, sino también toda su fisiología y forma de vida. Las especies que evolucionaron para ingerir alimentos abundantes y estáticos no necesitan desplazarse mucho ni requieren una gran inteligencia para saciarse; la hierba ni se esconde ni huye. Depender de alimentos difíciles de encontrar o capturar significa tener que viajar más y, a menudo, disponer de una complejidad cognitiva mucho mayor. Los monos araña frugívoros de Centroamérica y Sudamérica poseen un cerebro voluminoso y se desplazan cinco veces más lejos que los monos aulladores con los que comparten el bosque y que se alimentan de hojas. Los animales carnívoros de la sabana africana recorren al día el triple de distancia que los herbívoros a los que cazan.

El paso del estilo de vida de los simios y los primeros homininos, basado solo en la recolección, al del género *Homo*, basado en la caza y la recolección, tuvo importantes repercusiones. Propició aún más la cohesión de estos primates sociales. Alimentarse de carne exige cooperación y repartición, y no solo porque uno mismo no pueda matar o comerse una cebra. La carne es difícil de obtener, y compartir los alimentos vegetales, más previsibles, hace posible la concurrencia de la caza y la recolección dentro del grupo. Las poblaciones actuales de cazadores-recolectores obtienen casi la mitad de sus calorías diarias a partir de las plantas. Los análisis recientes de los alimentos que han quedado atrapados en el sarro fosilizado de dientes de neandertales muestran que incluso estos homininos, cazadores magistrales

Creados para movernos

Cuando los hominінos desarrollaron cambios anatómicos que facilitaron la marcha erguida (*dibujo*), pudieron abarcar más terreno con menos gasto energético, lo que les permitió propagarse hacia nuevos hábitats. La posterior aparición de la caza incrementó todavía más su grado de actividad, ya que les obligó a realizar desplazamientos más largos para obtener alimento. Nuestra fisiología se ha adaptado a esta forma de vida físicamente activa de tal manera que debemos realizar ejercicio para estar sanos.

DE PIE Y EN MOVIMIENTO

Los humanos difieren de los chimpancés y de otros simios por su postura erguida y su locomoción bípeda. Los rasgos anatómicos que permiten que la marcha y la carrera bípedas sean energéticamente eficientes evolucionaron durante millones de años.

Ardipithecus

Australopithecus afarensis

Homo erectus

Chimpancé

EVOLUCIÓN GRADUAL

Los antepasados humanos más antiguos, entre ellos *Ardipithecus* y *Australopithecus*, caminaban sobre dos piernas pero mantenían adaptaciones que les permitían trepar a los árboles, seguían una dieta herbívora como los simios actuales y vivieron solo en África. Hace 1,8 millones de años, el género *Homo* alcanzó las proporciones corporales actuales, adoptó una estrategia alimentaria basada en la caza y la recolección y salió de África para extenderse hacia Eurasia.

Torso vertical y agujero occipital situado en el centro de la base del cráneo		
Forma de la columna desconocida	Forma de la columna en S	Vértebras lumbares más grandes
Pelvis en forma de cuenco	Isquion más pequeño	Pelvis más robusta
Extremidades inferiores cortas, extremidades superiores largas	Extremidades superiores e inferiores alargadas	Extremidades inferiores largas, extremidades superiores y dedos cortos

Homo erectus
Australopithecus afarensis
Homo naledi
Ardipithecus kadabba
Ardipithecus ramidus
Homo sapiens
Bonobos
Chimpancés
Gorilas

Millones de años atrás 8 7 6 5 4 3 2 1 Hoy

MESA SCHUMACHER

e iconos de los seguidores de la paleodieta, muy rica en carne, tenían una alimentación equilibrada, con una gran cantidad de plantas, incluidos cereales [*véase* «La auténtica paleodieta», por Peter S. Ungar; Investigación y Ciencia, septiembre de 2018].

La caza y la recolección también impulsaron la evolución de la inteligencia. La innovación tecnológica y la creatividad implican más calorías y mayores probabilidades de reproducción. A medida que la coordinación y la comunicación ganaban importancia, la inteligencia social debió de adquirir un valor incalculable. Los descubrimientos de Alison Brooks, de la Universidad George Washington; Rick Potts, del Museo Nacional de Historia Natural del Instituto Smithsoniano, y sus colaboradores en el yacimiento de la cuenca del Olorgesailie, en Kenia, publicados en 2018, muestran que hace 320.000 años la cognición humana alcanzó la complejidad observada en los humanos modernos. Utilizaban pigmentos negros y rojos para la expresión visual y redes comerciales de larga distancia para conseguir material de primera clase para las herramientas de piedra. La época de estos hallazgos coincide bastante con los fósiles más antiguos de *Homo sapiens* hallados hasta la fecha, descubiertos en 2017 en el yacimiento de Yebel Igud, en Marruecos, de 300.000 años de antigüedad.

EL EJERCICIO NO ES UNA OPCIÓN; RESULTA ESENCIAL

Además, la caza y la recolección obligaron a los homininos a esforzarse mucho más para obtener su sustento. Ascender solo un poco en la cadena trófica significa que el alimento resulta más difícil de encontrar, puesto que en el entorno hay muchas más calorías vegetales que animales. Los cazadores-recolectores muestran una extraordinaria actividad. Suelen caminar entre 9 y 14 kilómetros por día (entre 12.000 y 18.000 pasos). Los hombres y las mujeres hadzas, en el norte de Tanzania, realizan más actividad física en un día que los estadounidenses en una semana, y viajan de tres a cinco veces más lejos cada día que cualquiera de los grandes simios, según demostré junto con David Raichlen, de la Universidad de Arizona, y Brian Wood, en la actualidad en la Universidad de California en Los Ángeles. Es muy posible que los primeros miembros de nuestro género, sin contar con el beneficio de las innovaciones tecnológicas como el arco y las flechas, fueran todavía más activos. En un artículo de referencia publicado en 2004, Dennis Bramble, de la Universidad de Utah, y Daniel Lieberman, de Harvard, sostuvieron que nuestro género evolucionó para perseguir a sus presas hasta el agotamiento, señalando una serie de características del esqueleto de *Homo erectus* que parecen poner de manifiesto la adaptación para la carrera de resistencia.

Podría pensarse que el aumento continuado del tamaño cerebral y de la complejidad tecnológica durante los dos últimos millones de años se produjo igual que crece una bola de nieve bajando por una ladera. Pero cualquier impresión de velocidad es mera ilusión. La evolución tiene buena memoria, pero no planifica. En 2015, Lee Berger, de la Universidad del Witwatersrand en Sudáfrica, y su equipo anunciaron el descubrimiento de cientos de fósiles de *Homo naledi*, una nueva especie hallada en los depósitos más profundos del sistema de cavidades de Rising Star en Sudáfrica, con una antigüedad de entre 236.000 y 335.000 años [*véase* «El misterioso *Homo naledi*», por Kate Wong; Investigación y Ciencia, mayo de 2016]. Con un tamaño cerebral solo un 10 por ciento superior al de *Australopithecus* y un tamaño corporal similar al de los primeros *Homo*, este hominino debió de pertenecer a un linaje de nuestro género que se estancó a inicios del Pleistoceno, persistiendo felizmente durante más de un millón de años sin que su cerebro aumentara de tamaño, como se observa en otras especies de *Homo*. La historia de *H. naledi* nos recuerda de forma importante que la evolución no está intentando llegar a ningún sitio. No fuimos inevitables.

TIBURONES EN LA SABANA

Ningún rasgo evoluciona de forma aislada: el cerebro debe encajar perfectamente en el cráneo, los dientes en la mandíbula, y los músculos, los nervios y los huesos deben funcionar de forma armónica. Los rasgos del comportamiento no son diferentes. Cuando una estrategia del comportamiento, como la caza y la recolección, se convierte en la norma, la fisiología se adapta para acomodarse e incluso depender de ella.

Un ejemplo lo ofrece la ingesta de vitamina C. Los primeros mamíferos desarrollaron un proceso de varias etapas para fabricar por sí mismos este nutriente fundamental, una cascada en la que intervienen varios genes que siguen siendo funcionales en roedores, carnívoros y muchos otros mamíferos. Hace decenas de millones de años, nuestros antepasados primates estaban tan centrados en comer frutas ricas en vitamina C que fabricarla por sí mismos conllevaba un coste innecesario. Su fisiología se adaptó a su comportamiento al acumular mutaciones en el gen que interviene en el paso final de la síntesis de la vitamina. Como consecuencia, los primates antropoides actuales (monos, simios y humanos) no podemos fabricarla. Sin ella en nuestras dietas, padecemos escorbuto y morimos.

Otro ejemplo algo más distante es la evolución de una forma especializada de respiración, llamada ventilación forzada, en varias especies de tiburones y peces escómbridos (el grupo en el que se incluyen el atún y la caballa). Estos linajes desarrollaron una estrategia alimentaria muy activa, nadando sin parar día y noche. Su anatomía y fisiología se adaptaron a esa conducta, aprovechando el movimiento constante hacia delante para introducir el agua en la boca y hacerla pasar por las branquias. Tal cambio eliminó la necesidad de bombear agua para que esta pasara por las branquias, lo que llevó a la pérdida evolutiva de la musculatura asociada a ellas. Ello permitió ahorrar energía, pero volvió a estas especies vulnerables a la asfixia. Si dejan de moverse, mueren.

Aunque hace tiempo que sabemos que el ejercicio es saludable para los humanos, solo estamos empezando a entender las muchas formas en las que nuestra fisiología se ha adaptado al esfuerzo físico que la caza y la recolección demandan. Casi todos los órganos lo han hecho, incluso las células. Algunos de los trabajos más fascinantes en esta área se han centrado en el cerebro. En primer lugar, nuestro cerebro ha evolucionado para dormir menos, incluso en sociedades sin iluminación artificial u otras distracciones nocturnas modernas. Los humanos de todo el planeta, ya sean los hadzas de la sabana africana, los horticultores tsimanes de la selva tropical amazónica o los urbanitas de Nueva York, duermen unas siete horas por la noche, mucho menos que los simios. Raichlen y sus colaboradores han demostrado que nuestro cerebro ha evolucionado para recom-

pensar la actividad física prolongada, de modo que produce endocannabinoides (el llamado subidón del corredor) cuando practicamos ejercicio aeróbico, como correr. Él y otros autores han llegado incluso a proponer que el ejercicio contribuyó a la gran expansión del cerebro humano y que hemos evolucionado de tal forma que necesitamos realizar actividad física para el desarrollo normal de este. El ejercicio provoca la liberación de moléculas neurotróficas que estimulan la neurogénesis y el crecimiento cerebral, y se sabe que mejoran la memoria y evitan el declive cognitivo relacionado con la edad.

Nuestro metabolismo ha evolucionado para dar cabida a la mayor actividad. La potencia máxima sostenida de los humanos, nuestro $VO_{2máx}$ (volumen máximo de oxígeno, o capacidad aeróbica), es al menos cuatro veces mayor que la de los chimpancés. Este aumento se debe sobre todo a las características de los músculos de nuestras piernas, los cuales son un 50 por ciento más grandes y tienen una mayor proporción de fibras «lentas», resistentes a la fatiga, que los de las piernas de otros simios. También poseemos más glóbulos rojos con los que transportar oxígeno a los músculos activados. Pero las adaptaciones para el ejercicio aparecen incluso a un nivel más profundo, en las células, que funcionan y queman calorías a un ritmo acelerado. Mi trabajo con Ross, Raichlen y otros ha demostrado que los humanos hemos desarrollado un metabolismo más rápido, que proporciona combustible para la mayor actividad física y para otros rasgos energéticamente costosos que nos caracterizan, incluido nuestro voluminoso cerebro.

Todos estos datos nos hacen cambiar nuestro modo de pensar sobre la actividad física. Desde la aparición de la licra en la década de 1980, realizar ejercicio se nos ha vendido como una forma de perder peso o como un elemento más para conseguir un estilo de vida saludable, como puede ser también comer magdalenas de salvado de avena. Pero el ejercicio no es simplemente una opción. Resulta esencial, aunque con él el beneficio para la salud que menos se consigue es adelgazar. Nuestro organismo ha evolucionado de tal modo que necesita una actividad física diaria. Más que hacer que nuestro cuerpo funcione más, el ejercicio hace que funcione mejor. Mi laboratorio y otros hemos demostrado que su práctica tiene escaso efecto sobre el gasto energético diario (los cazadores-recolectores hadzas queman el mismo número de calorías cada día que los occidentales sedentarios), una razón por la que el ejercicio constituye una estrategia poco eficaz para perder peso. En cambio, sí regula la forma en la que el cuerpo gasta la energía y coordina las tareas vitales.

Los avances recientes en metabolómica han revelado que ejercitar los músculos libera cientos de moléculas señalizadoras en el organismo, y solo estamos empezando a conocer las consecuencias de su alcance fisiológico. El ejercicio de resistencia mitiga la inflamación crónica, un importante factor de riesgo de padecer enfermedades cardiovasculares. Reduce los niveles de reposo de las hormonas esteroideas testosterona, estrógeno y progesterona, lo que ayuda a explicar la menor tasa de cánceres del aparato reproductor entre los adultos que realizan ejercicio con regularidad. También atenúa el aumento matutino de cortisol, la hormona del estrés. Se sabe además que disminuye la insensibilidad a la insulina, el mecanismo responsable de la diabetes de tipo 2, y ayuda a almacenar la glucosa en forma de glucógeno en los músculos, en lugar de grasa. Realizar ejercicio con regularidad mejora la eficacia de nuestro sistema inmunitario a la hora de evitar infecciones, sobre todo cuando envejecemos. Incluso la actividad liviana, como permanecer de pie en lugar de sentado, lleva a los músculos a producir enzimas que contribuyen a retirar la grasa de la sangre circulante.

No es extraño, pues, que poblaciones como los hadzas no padezcan cardiopatías, diabetes u otras enfermedades habituales de los países industrializados. Pero no necesitamos disfrazarnos de cazadores-recolectores o correr maratones para obtener los beneficios de un estilo de vida más coherente con nuestra biología. La lección que sacamos de pueblos como los hadzas, los tsimanes y otros es que la cantidad importa más que la intensidad. Estos grupos permanecen de pie y se desplazan de sol a sol, acumulando más de dos horas de actividad física al día, sobre todo caminando. Podemos emular esos mismos hábitos andando o yendo en bicicleta en lugar de conducir, subiendo escaleras, o hallando modos de trabajar y de entretenernos que nos obliguen a movernos. Un estudio reciente sobre los trabajadores de correos de Glasgow nos muestra cómo podríamos hacerlo. Estos hombres y mujeres no son deportistas entrenados, pero sí se mantienen activos todo el día entregando el correo. Aquellos que llegan a los 15.000 pasos o permanecen de pie siete horas cada día (unos números muy parecidos a los que vemos en los hadzas) exhiben una mejor salud cardiovascular y ninguna enfermedad metabólica.

Mientras nos ponemos con ello, para vivir bien podemos aprender otras lecciones de grupos como los hadzas. Más allá de realizar una gran cantidad de ejercicio y de seguir alguna dieta alimentaria, la vida diaria de estas culturas está llena de aire libre, amistad y familia. El igualitarismo es la norma, y apenas existe desigualdad económica. Ignoramos cómo afectan exactamente estos factores a la salud de los cazadores-recolectores, pero sí sabemos que su ausencia contribuye a la aparición de estrés crónico en el mundo desarrollado, lo que a su vez provoca obesidad y enfermedades.

Conseguir hábitos de vida más activos podría ser más fácil si no tuviéramos que luchar contra un gorila de 150 kilos alojado en nuestro ser. Al igual que la vitamina C para nuestros antepasados antropoides, el ejercicio era inevitable y abundante durante los últimos dos millones de años de la evolución de los homininos. No era necesario buscarlo, no había ninguna presión evolutiva para perder la antigua debilidad simia por la glotonería y la pereza. En la actualidad, a pesar de que dominamos nuestro entorno, le estamos concediendo mucho poder a nuestro simio interior si atendemos a cómo funciona el mundo moderno: nos llenamos de alimentos fáciles, vemos *The walking dead* en lugar de caminar y nos sentamos durante horas ante nuestros escritorios acicalándonos los unos a los otros a través de las redes sociales. Nos fascina ver algo de nosotros en los grandes simios, pero debería preocuparnos verlos a ellos reflejados en nosotros. Bajo la superficie, somos más diferentes de lo que parece. IyC

PARA SABER MÁS

The crown joules: Energetics, ecology, and evolution in humans and other primates. Herman Pontzer en *Evolutionary Anthropology*, vol. 26, n.º 1 págs. 12-24, enero/febrero de 2017.

Economy and endurance in human evolution. Herman Pontzer en *Current Biology*, vol. 27, n.º 12, págs. R613-R621, junio de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Incidencia de la dieta en la hominización. William R. Leonard en *IyC*, febrero de 2003.

La paradoja del ejercicio físico. Herman Pontzer en *IyC*, abril de 2017.

CONSERVACIÓN

¿Es posible salv

Los científicos cultivan, trasplantan y mejoran genéticamente los corales contrarreloj con el fin de acelerar su adaptación a un océano cada vez más cálido, pero el reto de reconstruir arrecifes enteros resulta abrumador

Rebecca Albright



UN EJEMPLAR DE *ACROPORA* de la Gran Barrera de Coral libera espermatozoides y óvulos. Todos los corales que habitan a lo largo de sus más de dos mil kilómetros frezan una sola vez al año, en verano.

ar los corales?



EN SÍNTESIS

El calentamiento global está matando los corales. El trasplante de ejemplares criados en cautividad es uno de los métodos estudiados para facilitar su adaptación.

Se ha comprobado que los corales sometidos a estrés activan genes que dan lugar a descendientes más resistentes. Además, la mejora de ciertas algas simbiontes puede mejorar su salud.

Estas técnicas podrían restaurar los arrecifes a escala regional, pero la recuperación global solo será posible si la humanidad ralentiza el calentamiento planetario.

Rebecca Albright es bióloga especialista en corales y conservadora de la Academia de Ciencias de California. Sus investigaciones persiguen averiguar el modo en que los arrecifes coralinos afrontan las condiciones ambientales variables



PERMANEZCO DE PIE EN UNA PLAYA AUSTRALIANA, CON LOS DEDOS DE LOS PIES ENTERRADOS EN LA ARENA, mientras subo la cremallera de mi traje de neopreno antes de sumergirme en la Gran Barrera de Coral. Mientras contemplo el mar, me emociono recordando mi última inmersión en este mismo lugar, justo hace una década. Crecí en Ohio y pasé mi infancia leyendo *Un día en la vida de un biólogo marino*, tras quedar cautivada por Discovery Channel. Obtuve mi título de submarinista en uno de los turbios lagos de Ohio, pero tan solo un año después logré viajar a la Gran Barrera. Recuerdo la ansiedad que me oprimía el pecho la víspera de la inmersión. Mi amiga Emily, ahora especialista en algas marinas, y yo especulábamos sobre cuánta autonomía podríamos tener con el aire de nuestras botellas, que finalmente nos brindaron dos mágicas horas de buceo. Quedamos fascinadas por un bosque de vibrantes corales, rebosante de sepias, almejas gigantes y plácidas tortugas marinas.

Estoy aquí de nuevo, ahora en calidad de investigadora posdoctoral en el Instituto Australiano de Ciencias Marinas. Entro en el agua hasta la barbilla, sumerjo la cabeza y miro en derredor a través de la máscara. Mi corazón se angustia. Ni rastro de las sepias. Tampoco veo almejas gigantes ni tortugas. El coral luce un aspecto monótono. La mayor parte de la vibrante vida marina ha sido sustituida por arena y algas. Aunque conocía los relatos de otros investigadores más veteranos sobre cómo un determinado arrecife se había degradado a lo largo de sus vidas, me siento demasiado joven como para ser testigo de un cambio de tamaña magnitud en solo diez años. Debería presenciar esto al final de mi carrera, no al principio.

Esa traumática revelación tuvo lugar en 2014, al inicio del tercer episodio de blanqueo en masa del coral. A menudo confundidos con rocas o plantas, los corales están constituidos por colonias de animales diminutos (pólipos) que albergan en su seno algas microscópicas, las cuales les confieren su color y les suministran alimento. El estrés causado por el aumento de la temperatura les induce a expulsar las algas; como consecuencia se vuelven blancos y caen presa de la inanición y las enfermedades. El blanqueo en masa duró tres largos años y dejó asolados arrecifes enteros en todo el mundo, a la par que muchos corazones desolados. Amenazados por la sobrepesca, la contaminación y la acidificación de los mares, nadie duda de que el principal problema a corto plazo proviene del calentamiento del agua de mar.

Los dos episodios precedentes de blanqueo en masa ocurrieron en 1998 y 2010; ambos fueron desencadenados por un calentamiento asociado al fenómeno de El Niño. El episodio de 2014 a 2017 ha sido el más duradero y extenso, pues ha dañado más del 70 por ciento de los arrecifes del planeta. Dos tercios de la Gran Barrera han muerto o han sufrido un blanqueo generalizado, cuyos efectos devastadores aún perduran. Los arrecifes están desapareciendo ante nuestros ojos. Durante los últimos 30 años, el mundo ha perdido el 50 por ciento de ellos y algunos calculan que en 2050 quedará solo una décima parte. Necesitamos soluciones y las necesitamos ahora.



BUCEADORES fijando a un arrecife fragmentos de coral criados en tierra firme, en el Laboratorio Marino Mote, de Florida. Al crecer, repoblarán el arrecife, en una estrategia similar a la repoblación forestal.

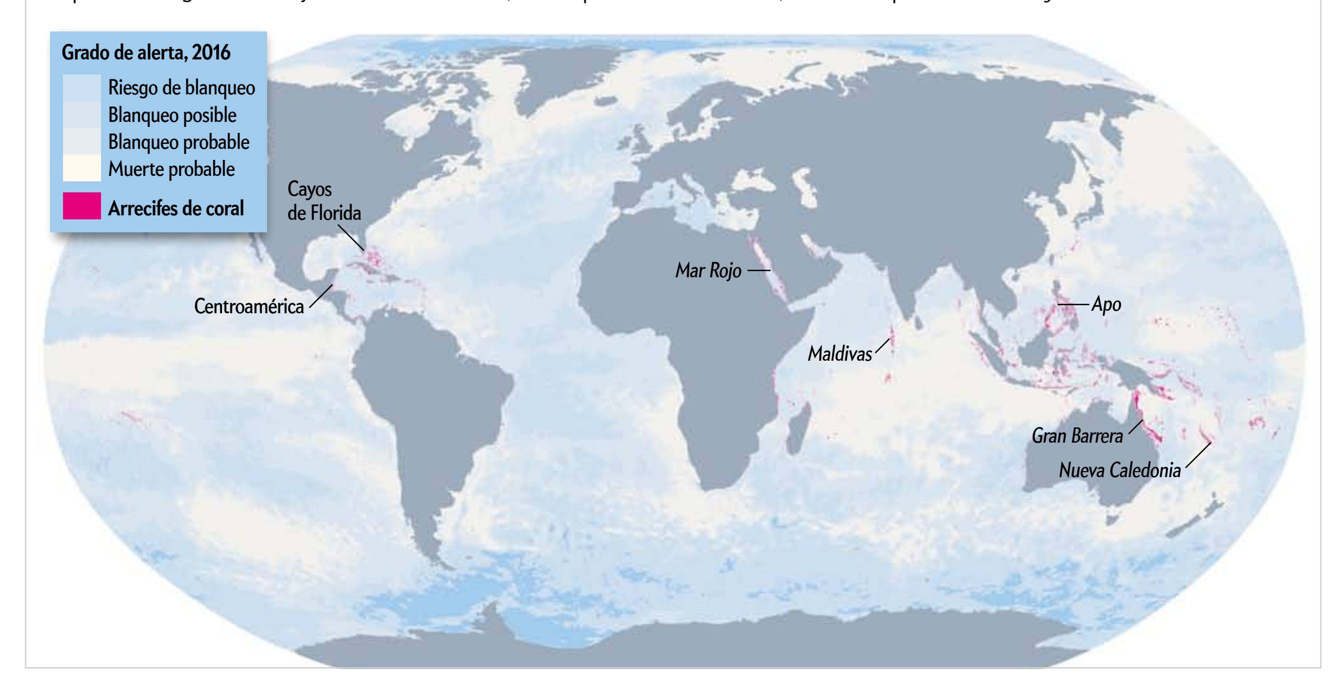
Si bien cubren solamente el 0,1 por ciento del fondo marino, los arrecifes coralinos albergan casi un cuarto de las especies marinas y sustentan pesquerías que alimentan a millones de personas en todo el planeta. Además, actúan como rompeolas naturales que protegen las ciudades y pueblos costeros al disipar la energía del oleaje hasta un 97 por ciento y reducir la altura de las olas un 84 por ciento. Y por si todo eso no bastara, generan pingües ingresos gracias al turismo. Su desaparición pondría en riesgo la subsistencia de 500 millones de personas y acarrearía pérdidas superiores a los 25.000 millones de euros en bienes y servicios. Incluso muchos de quienes no se benefician directamente de ellos se verían afectados anímicamente por semejante pérdida. Como escribiera Luiz Rocha, mi colega en la Academia de Ciencias de California: «Quizá no vea nunca la *Mona Lisa*, pero, aun así, no desearía que ardiera».

Apremiados por la urgencia, los especialistas están ensayando cada vez métodos más atrevidos e inventivos para conservar y restaurar los arrecifes coralinos. Buscamos técnicas que puedan ser aplicables a gran escala y no resulten ruinosas. En este momento nos centramos en un puñado de opciones complementarias que combinan procesos naturales con la intervención

PÁGINAS ANTERIORES: GETTY IMAGES; ESTA PÁGINA: CORTESÍA DE JOE BERG, *WAY DOWN VIDEO*

El peor blanqueo de coral jamás registrado

El incesante calentamiento de los mares acaecido entre 2014 y 2017 provocó el episodio de blanqueo más grave jamás registrado. Más del 70 por ciento de los arrecifes coralinos del planeta se vieron afectados. Tan solo en 2016 (*mapa*), gran parte del globo presentó condiciones inadecuadas para el coral (*regiones blancas*). El agua caliente estresa a los pólipos coralinos, lo cual los obliga a expulsar las algas de sus tejidos. Como resultado, se ven privados de alimento; la colonia queda debilitada y acaba muriendo.



humana. Todo ello podría ofrecer a los corales la oportunidad que necesitan para sobrevivir durante las próximas décadas, plazo en el que esperamos que la humanidad reduzca drásticamente las emisiones y el calentamiento se atenúe.

A menudo me preguntan si los arrecifes coralinos sobrevivirán. En mi opinión, la respuesta correcta es que son resilientes y podrían conseguirlo, pero ahora mismo necesitan una tregua.

GUARDERÍAS DE CORAL

Si buceamos a unos siete kilómetros de las costas de Florida, podremos ver un bosque de árboles de plástico de cuyas ramas cuelgan corales, a modo de adornos navideños. En estos viveros, así como en otros emplazados en tierra firme, se pretende fomentar su crecimiento antes de proceder al trasplante en arrecifes degradados. Los viveros aprovechan la capacidad de estos animales coloniales para reproducirse tanto de forma sexual como asexual. Un coral es una colonia de clones; cada uno está formado por cientos o miles de pólipos genéticamente idénticos, clones de sí mismos. Estos poseen la facultad de multiplicarse sexualmente mediante la producción de espermatozoides y óvulos que se fusionan para formar larvas, o asexualmente mediante la gemación de los pólipos.

El oleaje quiebra a veces las ramas de coral y arrastra los fragmentos a cierta distancia, donde pueden fijarse nuevamente al substrato y reanudar su crecimiento clonal. En los viveros, el coral se rompe deliberadamente para producir clones idénticos. Hoy se crían con éxito unas 90 especies de todo el mundo y decenas de miles de ejemplares se trasplantan anualmente en arrecifes degradados del Caribe y del Atlántico occidental, gracias a los fondos privados y públicos destinados a la recuperación de los arrecifes coralinos.

Pero los investigadores buscan otros métodos que consoliden estas actuaciones de restauración. Dave Vaughan, del Laboratorio Marino Mote, en Florida, descubrió hace poco que el coral es capaz de crecer entre 25 y 50 veces más rápido de lo normal cuando se rompe en fragmentos del tamaño de una goma de borrar, gracias a su capacidad natural de regeneración. Además, si se colocan fragmentos genéticamente idénticos (procedentes del mismo coral) a pocos centímetros unos de otros, crecen hasta quedar unidos y forman una gran colonia. En cuestión de meses, el equipo de Vaughan produce así corales del tamaño de una pelota de fútbol; se precisarían años para obtener de forma natural ejemplares de tales dimensiones. Cuando empezó, hace 12 años, los métodos al uso le permitieron producir 600 corales en seis años. Ahora su equipo obtiene 600 en una tarde y ha tenido éxito con la media docena de especies que ha probado. El objetivo ahora es producir y trasplantar 50.000 corales este año y 100.000 el próximo. Y ha jurado no retirarse hasta haber trasplantado un millón. Cuando empezó, producir cada coral costaba 1000 dólares. Hoy, gracias a los avances técnicos y a la mejora de la eficiencia, el coste unitario no alcanza los 20 dólares. Vaughan está convencido de que, gracias a la ciencia ciudadana y al voluntariado, será posible rebajarlo aún más hasta dos dólares, uno por la producción y otro por el trasplante. Aunque el Servicio Nacional de Pesca Marítima de Estados Unidos calcula que serán precisos 255 millones de dólares y 400 años para restaurar las poblaciones caribeñas de corales cuerno de ciervo y cuerno de alce, Vaughan

FUENTE: SATÉLITES Y SERVICIO DE INFORMACIÓN DE LA NOAA; MAPPING SPECIALISTS (*mapa*)

se propone borrarlas de la lista de especies amenazadas antes de dejar este mundo.

Ya sabemos criar corales en cautividad y podemos, en muchos casos, restaurar los arrecifes, pero solo a escala local. El salto a la escala ecosistémica sigue siendo enorme; una de las mayores trabas radica en repoblar vastas extensiones. La mayoría de los proyectos actuales abarcan menos de una hectárea, pero la degradación opera a escalas de cientos o miles de kilómetros cuadrados. El coste de replantar la inmensidad de la Gran Barrera de Coral, de 2300 kilómetros de longitud, se ha cifrado en 200.000 millones de dólares, a razón de 5 dólares por cada fragmento de coral producido. El esfuerzo valdría la pena, pues la restauración recuperaría importantes pesquerías que alimentan a mucha gente, crearía numerosos empleos y protegería los litorales y las ciudades costeras de los temporales.

EL SEXO EN LOS CORALES

Además de multiplicarlos asexualmente en viveros, se está intentando mejorar su capacidad de reproducción sexual con el fin de ampliar su variabilidad genética. Las poblaciones coralinas en declive pierden riqueza genética, lo que, a su vez, merma la capacidad para resistir el calentamiento del agua. Muchos arrecifes caribeños, por ejemplo, están dominados por un único clon y tanto la historia como la ciencia nos enseñan que depender de una baja variabilidad genética, sobre todo en tiempos de cambios ambientales, puede abocar al desastre. Durante el siglo XIX, un solo clon de patata de la variedad Lumper constituyó la principal fuente de alimento para la creciente población de Irlanda, hasta que una plaga de roya arrasó las cosechas causando una hambruna que diezmó a sus habitantes y arruinó la economía de la isla. A buen seguro, el estrago hubiera sido menor de haberse cultivado una mayor diversidad. Tal como sucede con las patatas y las personas, la diversidad genética puede hacer a los corales menos vulnerables al estrés ambiental.

La reproducción sexual es el mecanismo ideado por la naturaleza para generar esa diversidad. El coral es sésil, permanece fijo en el fondo marino, así que no puede vagar en busca de pareja. Para reproducirse de forma sexual, la mayoría libera espermatozoides y óvulos al agua donde, con suerte, se consuma la fecundación. En zonas degradadas, en las que el coral escasea y se halla muy disperso, las posibilidades de éxito disminuyen drásticamente.

La Academia de Ciencias de California, en cooperación con The Nature Conservancy y SECORE Internacional, una entidad dedicada a la conservación de los corales, pretende ayudar a que estos culminen con éxito ese delicado proceso. Conocemos con bastante exactitud la época de freza de varias especies coralinas, que resultan inesperadamente románticas: las colonias liberan los óvulos y los espermatozoides a finales de verano, tras la puesta de sol y en torno al plenilunio. Durante las noches en que prevemos el fenómeno, buceamos hasta las colonias y recolectamos los gametos con la ayuda de redes. Luego, los llevamos al laboratorio, donde propiciamos la fecundación en cubos llenos de agua de mar. Las larvas, que sí son móviles, suelen tener el tamaño de una semilla de sésamo y sufren una elevada depredación en el medio natural antes de asentarse y comenzar a crecer. Por ello, las mantenemos en cautividad hasta que alcanzan una talla suficiente como para ser trasplantadas con garantías. El objetivo no es renovar el arrecife entero, sino maximizar la variabilidad genética y aumentar la población lo suficiente para que pueda recuperarse por sí misma y sea más resistente a los cambios ambientales. Multitud de arrecifes presentan una baja diversidad genética y eso limita sus posibilidades de reproducción. Combinando las técnicas de restauración sexual y asexual es posible regenerar un arrecife hasta el punto en que sea capaz de estimular el desarrollo de otros nuevos en sus proximidades.

1



2



LOS ESPERMATOZOIDES y los óvulos de un coral cuerno de alce se recolectan bajo el agua (*1*) en tubos (*2*). Una vez en el laboratorio, los gametos se combinan con los de otros corales para crear nuevas variedades. Así se incrementa la diversidad genética y se mejora la resistencia al estrés.

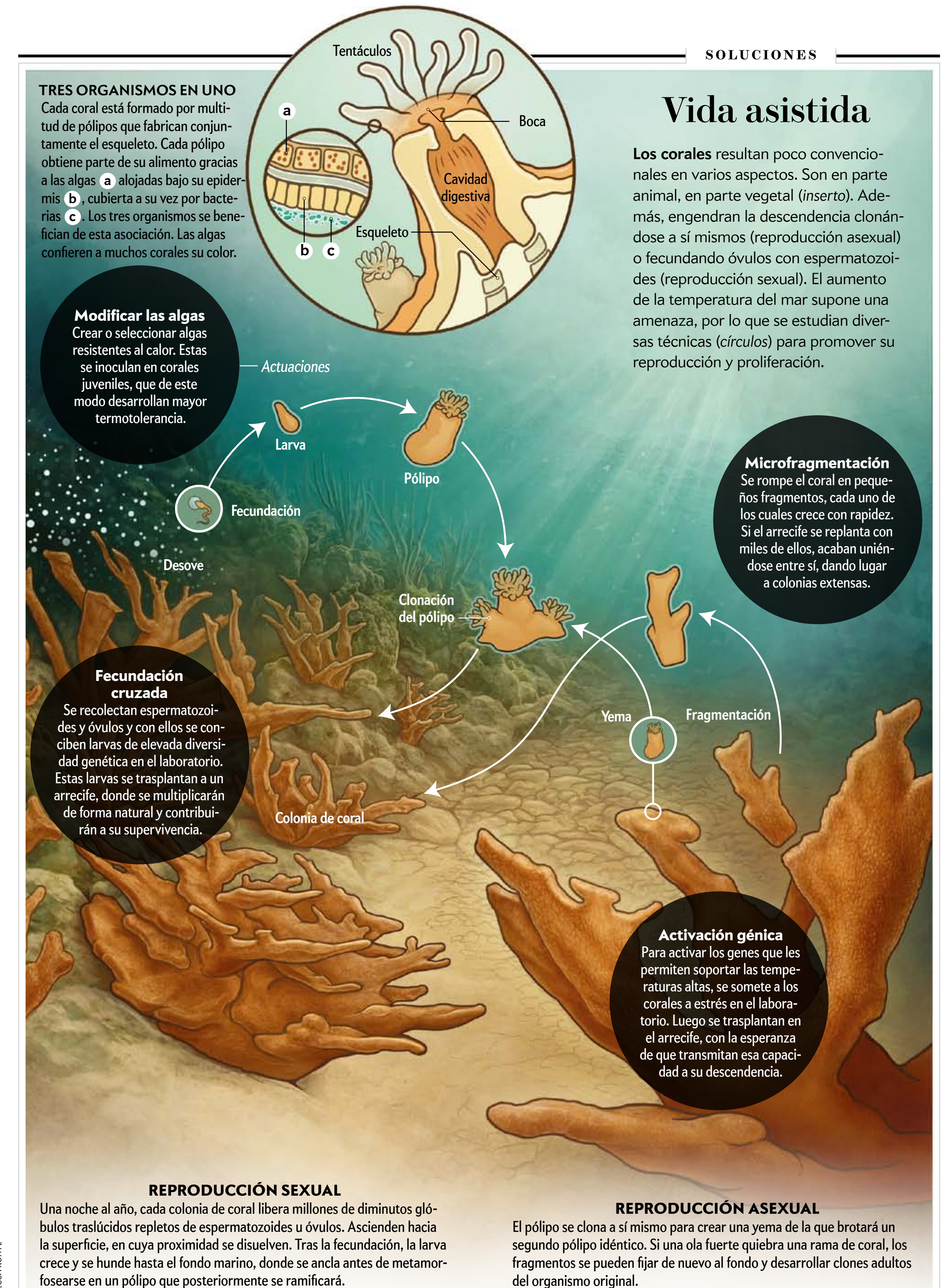
En libertad, la probabilidad de supervivencia de una larva de coral es de apenas una entre un millón, por lo que hacemos todo lo posible para ayudarlas a superar esa fase tan crítica de su existencia. Actualmente, la fecundación del coral y la fijación de las larvas en pedazos de cerámica, que luego pueden ser trasplantados, raya el cien por cien en cautividad, lo que incrementa el número de ejemplares sexualmente compatibles y mejorará la reproducción natural en un futuro próximo sin nuestra ayuda. Durante uno de los desoves masivos acaecido en la isla antillana de Curasao, hace dos años, ayudé a un equipo de SECORE a recolectar 5 millones de óvulos de 25 colonias en tan solo dos días. Se trata de un nuevo récord para la entidad «y demuestra la escala a la que es posible trabajar», según Dirk Petersen, su fundador.

Uno de los mayores obstáculos estriba en mantener con vida los pequeños corales una vez son trasplantados al mar. Al fin y al cabo, la degradación de las condiciones ambientales es la causa última de su declive, por lo que mientras no resolvamos el cambio climático, la contaminación y la sobrepesca a través de la acción política, la concienciación y la modificación de nuestro modo de vida, simplemente estaremos poniendo parches para ganar tiempo y mantenerlos con vida. Por el camino, quizá tengamos la fortuna de seleccionar nuevos genotipos a través de la reproducción sexual que luego podamos producir en masa mediante las técnicas de multiplicación asexual, trasplantarlos y dejar que la madre naturaleza seleccione los más aptos.

CORTESÍA DE PAUL SELVAGGIO, SECORE INTERNATIONAL

Vida asistida

Los corales resultan poco convencionales en varios aspectos. Son en parte animal, en parte vegetal (*inserto*). Además, engendran la descendencia clonándose a sí mismos (reproducción asexual) o fecundando óvulos con espermatozoides (reproducción sexual). El aumento de la temperatura del mar supone una amenaza, por lo que se estudian diversas técnicas (*círculos*) para promover su reproducción y proliferación.



TRES ORGANISMOS EN UNO
Cada coral está formado por multitud de pólipos que fabrican conjuntamente el esqueleto. Cada pólipo obtiene parte de su alimento gracias a las algas (a) alojadas bajo su epidermis (b), cubierta a su vez por bacterias (c). Los tres organismos se benefician de esta asociación. Las algas confieren a muchos corales su color.

Modificar las algas
Crear o seleccionar algas resistentes al calor. Estas se inoculan en corales juveniles, que de este modo desarrollan mayor termotolerancia.

Microfragmentación
Se rompe el coral en pequeños fragmentos, cada uno de los cuales crece con rapidez. Si el arrecife se replanta con miles de ellos, acaban uniéndose entre sí, dando lugar a colonias extensas.

Fecundación cruzada
Se recolectan espermatozoides y óvulos y con ellos se conciben larvas de elevada diversidad genética en el laboratorio. Estas larvas se trasplantan a un arrecife, donde se multiplicarán de forma natural y contribuirán a su supervivencia.

Activación génica
Para activar los genes que les permiten soportar las temperaturas altas, se somete a los corales a estrés en el laboratorio. Luego se trasplantan en el arrecife, con la esperanza de que transmitan esa capacidad a su descendencia.

REPRODUCCIÓN SEXUAL
Una noche al año, cada colonia de coral libera millones de diminutos glóbulos traslúcidos repletos de espermatozoides u óvulos. Ascienden hacia la superficie, en cuya proximidad se disuelven. Tras la fecundación, la larva crece y se hunde hasta el fondo marino, donde se ancla antes de metamorfosearse en un pólipo que posteriormente se ramificará.

REPRODUCCIÓN ASEXUAL
El pólipo se clona a sí mismo para crear una yema de la que brotará un segundo pólipo idéntico. Si una ola fuerte quiebra una rama de coral, los fragmentos se pueden fijar de nuevo al fondo y desarrollar clones adultos del organismo original.

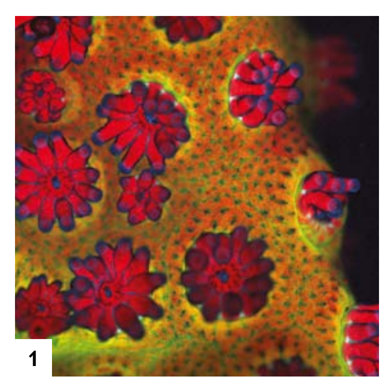
REBECCA KONTE

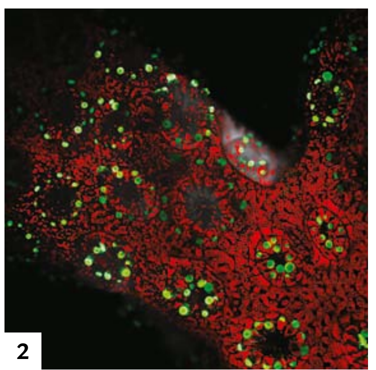
SUPERCORALES

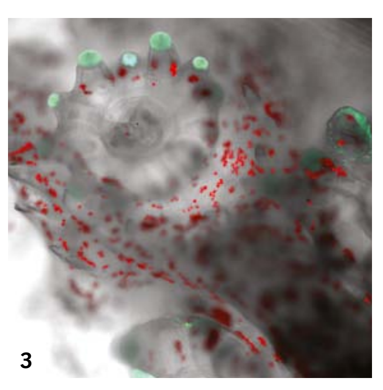
Pero no podemos confiar en la suerte. Los océanos están cambiando demasiado rápido como para permitir la adaptación del coral y por ello hay quien busca formas de acelerar el ritmo de la adaptación. Una estrategia consiste en la evolución asistida: potenciar las características que permiten al coral, y a otros habitantes del arrecife, tolerar el estrés y recuperarse del blanqueo. En realidad, la evolución asistida ya forma parte de nuestra vida cotidiana. La mayoría de los alimentos que compramos han sido seleccionados o modificados de algún modo, como los tomates resistentes a las plagas. También nuestros animales de compañía han sido criados de forma selectiva para potenciar ciertos rasgos estéticos o de carácter. Entonces, ¿por qué no criar o mejorar los corales para que resistan al cambio climático?

Ruth Gates, del Instituto de Biología Marina de Hawái, y Madeleine van Oppen, del Instituto Australiano de Ciencias Marinas, colaboran para potenciar la resistencia al estrés. Gates somete a los corales a un «entrenamiento ambiental» para ayudarlos a soportarlo. Cuando algunos quedan expuestos a temperaturas subletales, activan ciertos genes que pueden ayudarlos a la larga a soportar las altas temperaturas. Este proceso, denominado reajuste epigenético, sería más interesante aún si el coral entrenado fuera trasplantado al arrecife y lograra transferir ese atributo a su descendencia, creando así una generación de supercorales. En teoría, el reajuste epigenético debería mejorar su capacidad para resistir al blanqueo.

Nuestros conocimientos del proceso son aún elementales. Los estudios preliminares de laboratorio parecen prometedores, pero no se han llevado a cabo ensayos sobre el terreno. Cuando se hagan, sabremos si las generaciones siguientes heredan las facultades de sus predecesores trasplantados, si el procedimiento es viable a gran escala, qué coste tiene y si entraña algún riesgo.







LAS ALGAS (*rojo*) alimentan a este coral sano del género *Pocillopora* (*1*). Con el aumento de la temperatura del agua, las algas son expulsadas (*2*), hasta que el coral emblanquece (*3*) y deja de obtener azúcares. (Los puntos verdes son proteínas). Los científicos esperan desarrollar algas tolerantes a las altas temperaturas capaces de sobrevivir en mares más cálidos.

CORTESÍA DE AMY EGGERS (*1*); CORTESÍA DE AMY EGGERS, KATIE BAROTT Y MINDY MIZOBE (*2,3*)

Van Oppen está explorando la cría selectiva. Toda especie alberga un cierto grado de variabilidad genética, que le confiere mayor o menor resistencia al blanqueo o a las enfermedades. A semejanza de los criadores caninos que refinan los caracteres hasta obtener lo deseado, podremos producir descendencia resistente si somos capaces de reconocer las colonias de esa naturaleza y multiplicarlas con éxito. En último término, podremos mejorar la tolerancia global a las altas temperaturas de arrecifes enteros a medida que las generaciones sucesivas incorporen los genes adecuados.

Sin embargo, la crianza no es tarea fácil, puesto que el coral precisa toda una década para alcanzar la madurez sexual. Su adaptación a los cambios ambientales resulta igualmente complicada por el mismo motivo. Pero los microbios y las algas que viven en simbiosis con él y que tanta influencia llegan a tener en su salud suelen madurar mucho más deprisa. Por esa razón, se intenta manipular dichos organismos mediante selección artificial para engendrar corales sanos. En los últimos años hemos descubierto la enorme influencia que las comunidades bacterianas alojadas en el cuerpo humano, el microbioma, ejercen sobre nuestra salud, para bien y para mal. Los probióticos mejorarían en principio la digestión, la respuesta inmunitaria y la salud en general, por lo que ahora están disponibles por doquier, desde en el yogur al té kombucha o el chocolate.

Van Oppen está concibiendo en el laboratorio nuevas cepas de algas que inocula en corales jóvenes para averiguar si les confieren tolerancia térmica. Junto con Gates, estudia si los resultados mejoran con la aplicación simultánea del reajuste epigenético, la cría selectiva y la manipulación microbiana en un mismo coral.

Muchas de las técnicas son nuevas, pero ya disponemos de pruebas de que combinadas pueden tener más éxito. La estrategia sería la siguiente. En primer lugar, recurriríamos a la reproducción sexual y a la evolución asistida para generar mayor y mejor diversidad genética en las poblaciones coralinas y obtener así individuos más termotolerantes. Luego los produciríamos en masa en los viveros mediante las técnicas de reproducción asexual y los trasplantaríamos a los arrecifes.

¿Lo veremos pronto? En realidad, no. Algunas técnicas, como la cría selectiva, no plantean graves dificultades, son baratas y eficaces. Pero necesitamos investigar más para determinar la viabilidad y la capacidad de las otras técnicas a gran escala, así como evaluar los riesgos ecológicos imprevistos. Quizá, los organismos mejorados genéticamente adquieran características que los lleven a suplantar las poblaciones originales, en lugar de mezclarse con ellas, lo que podría dar al traste con los esfuerzos para ayudar a los arrecifes.

CONGELADOS A LA ESPERA DEL FUTURO

Ya escojamos una sola técnica o una combinación de ellas, existe un paso crucial: conservar esperma, óvulos, larvas y fragmentos de coral completos en el equivalente a un banco de semillas. Esta es la estrategia adoptada desde hace décadas por los agrónomos para mejorar las cosechas y potenciar la resistencia a las plagas y la tolerancia a la sequía. Los bancos permitirán extraer elementos biológicos conforme sean necesarios para mejorar la resiliencia y la diversidad del coral.

Siguiendo los consejos de los programas de fecundación in vitro, Mary Hagedorn, del Instituto Smithsoniano de Conser-



UN INVESTIGADOR examina los corales trasplantados en una bahía cercana al Laboratorio Gates del Coral en Hawái con el fin de comprobar los efectos de la acidificación del océano, otro factor de estrés impuesto por el cambio climático.

vación Biológica, ha creado el primer repositorio genético para especies amenazadas de coral. En la fecundación in vitro, los espermatozoides y los ovocitos se congelan en nitrógeno líquido a temperaturas sumamente bajas. Posteriormente se descongelan en el laboratorio, se consuma la fecundación y el embrión se implanta en el útero. Desarrollado inicialmente para la especie humana, el concepto de crioconservación se ha extendido a especies amenazadas de todo el planeta.

En 2004, bastantes años después del nacimiento del primer ser humano engendrado a partir de un óvulo crioconservado, Hagedorn inició el programa de crioconservación de corales. Su equipo ha desarrollado un método para la congelación de los espermatozoides que podría aplicarse a una amplia variedad de especies coralinas. Hasta el momento, han logrado conservar con éxito 16 especies de diversas partes del mundo, lo que representa un 2 por ciento de las 800 conocidas. El esperma descongelado tiene tasas de fecundidad similares a las de su homólogo fresco, y los embriones se desarrollan con normalidad y dan lugar a juveniles sanos.

Hagedorn ha repartido el germoplasma, o tejido vivo, por criobancos de varios países. En teoría, puede permanecer congelado indefinidamente y revivir al cabo de cientos o miles de años. Las líneas celulares germinales podrán ser descongeladas y destinadas a programas de cría en cautividad o en la naturaleza. Por ejemplo, el esperma congelado puede fecundar óvulos en lugares situados más allá de su radio de dispersión natural, introduciendo así nuevos genes en el acervo regional. Y, por supuesto, los bancos permiten conservar especies que podrían desaparecer con la muerte de los arrecifes.

Hagedorn espera conservar pronto óvulos, además de espermatozoides y larvas criogenizados. Luego lo intentará con microfragmentos completos. También trabaja en la criogenización de testículos de peces para contribuir a la conservación de la ictiofauna coralina. A largo plazo, piensa en un futuro donde el germoplasma del coral y de otras especies arrecifales amenazadas permanezca custodiado en instalaciones de alta seguridad, desde donde se distribuirán óvulos, espermatozoides y embriones para fomentar la diversidad genética y reconstruir los arrecifes. «No sabemos lo que la ciencia será capaz de hacer en 100 años», afirma Hagedorn.

¿Cuál será el siguiente paso? Algunas de las soluciones tal vez puedan parecer muy poco convencionales a los ojos actuales, pero hemos de invertir en estrategias para el mañana. Muchas de las técnicas tendrán que ser evaluadas fuera del papel o del laboratorio, y existen dudas sobre nuestra capacidad para aplicarlas a gran escala, su coste y las consecuencias ecológicas que puede acarrear la manipulación de los arrecifes. Sin embargo, la inacción supone una amenaza para los corales y las numerosas especies que dependen de ellos.

De lo que estamos seguros es de que no existe una única solución para todos los problemas que afectan a los arrecifes de coral. Estamos recurriendo a todo lo que tenemos a mano para ganar tiempo. Ninguna de las técnicas actuales los salvarán a escala global, pero muchas resultan prometedoras a escala local o regional. Los arrecifes del mañana quizá no se parezcan a los de hoy, pero aún podrán proporcionar importantes bienes y servicios a los ecosistemas y la gente. El cambio climático, la contaminación y la sobrepesca constituyen sus mayores amenazas. Hemos de enfrentarnos a ellas de forma colectiva para salvaguardar los océanos y conceder a los corales el espacio vital que necesitan para sobrevivir. IyC

PARA SABER MÁS

Corals as paleontological clocks. S. K. Runcorn en *Scientific American*, octubre de 1966.

Global warming and recurrent mass bleaching of corals. Terry P. Hughes et al. en *Nature*, vol. 543, págs. 373-377, 16 de marzo de 2017.

California Academy of Sciences' reef program: **www.calacademy.org/explore-science/hope-for-reefs**

Mote Marine Laboratory's micro fragment program: **https://mote.org/research/program/coral-reef-restoration**

SECORE International's coral conservation program: **www.secore.org**

EN NUESTRO ARCHIVO

Arrecifes coralinos. Blanqueo por estrés. Barbara E. Brown y John C. Ogden en *IyC*, marzo de 1993.

Preocupación por el coral. Iain McCalman en *IyC*, julio de 2014.

por Jesús Julio Camarero y Miguel Ortega Martínez

La longevidad de las sabinas

Estos arbustos pueden alcanzar edades muy elevadas, sobre todo en escarpes y cañones rocosos

Con la creciente emisión de gases de efecto invernadero, el aumento de las temperaturas y otras alteraciones, los humanos estamos sometiendo la biosfera a un cambio global. Para conocer el modo y el ritmo en que se está produciendo este cambio necesitamos registros de las condiciones climáticas y ecológicas del pasado que nos ofrezcan un contexto temporal con el que comparar la situación actual.

Una forma de obtener esta información consiste en estudiar los anillos de crecimiento de los troncos de ciertas plantas leñosas, una ciencia conocida como dendrocronología. Al medir el grosor, la densidad y la composición química de estos anillos podemos deducir la evolución del clima (temperatura y precipitación) del pasado, así como otros datos de interés ecológico, como el acontecimiento de un incendio.

En España, las reconstrucciones dendrocronológicas se limitan a los últimos 1000 años, edad máxima de la mayor parte de los árboles más viejos, que corresponden a pinos laricios de la sierra de Cazorla y pinos negros de los Pirineos. Sin embargo, estos bosques de montaña no son representativos de las condiciones secas y variables del clima mediterráneo.

Nuestro grupo de investigación ha explorado los cañones en la sierra de Guara (Huesca), una de las cadenas más importantes del Prepirineo, y ha descubierto algunos arbustos muy longevos sometidos a condiciones mediterráneas. Se trata de sabinas negrales (*Juniperus phoenicea*) que viven en grietas de escarpes y presentan troncos muy retorcidos. Desgraciadamente, los anillos de estos arbustos son muy difíciles de estudiar porque a menudo no se distinguen bien o se fusionan

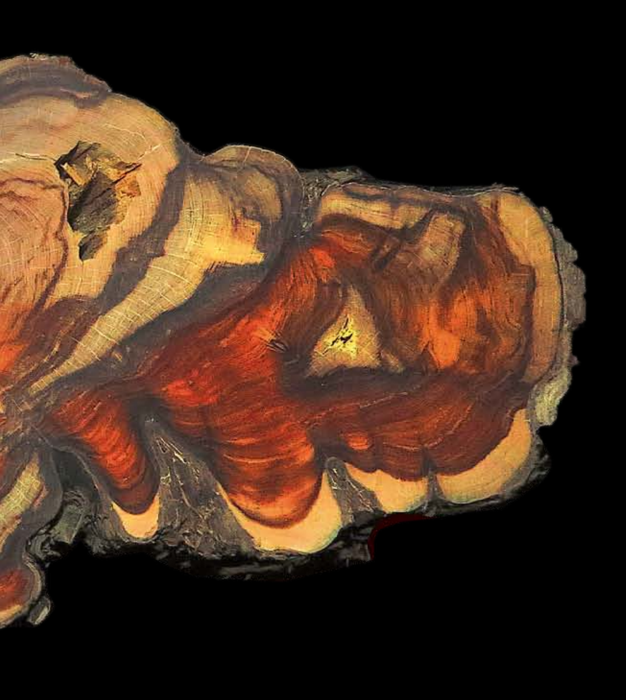


Si eres investigador en el campo de las ciencias de la vida y la naturaleza, y tienes buenas fotografías que ilustren algún fenómeno de interés, te invitamos a participar en esta sección. Más información en **www.investigacionyciencia.es/decerca**

entre sí. Por este motivo resulta necesario realizar dataciones basadas en isótopos de carbono-14, en concreto del tejido de la médula, la parte más vieja del individuo. Hemos calculado así que las sabinas de la sierra de Guara podrían alcanzar los 1450 años de edad.

La antigüedad de las sabinas españolas no resulta extraordinaria, ya que existen ejemplares de esta especie de una edad similar en el sur de Francia. Tal longevidad en las plantas leñosas es propia de los escarpes rocosos y se ha asociado a una disminución del metabolismo y del crecimiento vegetal a causa de la escasez extrema de nutrientes y agua disponibles en el sustrato.

—Jesús Julio Camarero
Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC)
—Miguel Ortega Martínez
Espacio Salto de Roldán, Huesca



LOS ESCARPES ROCOSOS de cañones y zonas de difícil acceso de la sierra de Guara albergan individuos muy viejos de sabinas negrales (*Juniperus phoenicea, arriba*). Se caracterizan por un tronco muy retorcido y en espiral, copa deforme o achaparrada, y crecimiento a menudo invertido. El corte transversal de su tronco muestra una forma muy lobulada (una parte del perímetro del tronco está muerta), donde los anillos de crecimiento a menudo están ausentes o se fusionan entre sí (*izquierda*).

por Julio Ostalé

Julio Ostalé es profesor de lógica y teoría del conocimiento en la Universidad Nacional de Educación a Distancia.



Popper y Kuhn sobre el progreso científico

¿Innumerables refutaciones o unas pocas revoluciones?

El 13 de julio de 1965 se celebraba en Londres el simposio «Criticism and the growth of knowledge». Fue en aquel acto donde se inició el famoso debate entre el filósofo Karl Popper y el historiador de la ciencia Thomas S. Kuhn en torno al progreso científico, debate que ha marcado todos los modelos contemporáneos sobre cómo y por qué unas teorías son sustituidas por otras.

Popper había publicado en 1959 *The logic of scientific discovery* (*La lógica de la investigación científica*, Tecnos, 1962), disponible desde 1934 pero solo en alemán. Kuhn acababa de publicar en 1962 *The structure of scientific revolutions* (*La estructura de las revoluciones científicas*, Fondo de Cultura Económica, 1971), que iniciaba el giro historicista al que se sumarían Lakatos, Feyerabend, Hanson, Toulmin y también Laudan una década más tarde.

El falsacionismo de Popper

Según Popper, la ciencia avanza a través de hipótesis audaces y falsaciones severas. En la imagen decimonónica, la ciencia parte de hechos para inferir desde ahí teorías. Popper, en cambio, defiende que partimos siempre de alguna teoría previa, que orienta nuestra atención hacia unos hechos más que hacia otros, y por medio de esa teoría intentamos solucionar problemas. Desde esta perspectiva, los momentos del progreso científico serían cuatro.

Primero nos enfrentamos a los problemas, ya sean prácticos (¿Cómo curo esta gripe?) o teóricos (¿Qué es la gripe?). Después proponemos hipótesis a modo de soluciones tentativas. Dichas hipótesis son entidades abstractas que se corresponden con enunciados, desde «Todos los cisnes son blancos», hasta la ley de gravitación de Newton. El modo como inventamos las hipótesis es, según Popper, un misterio. En tercer lugar, una vez que las hipótesis han sido formuladas, el verdadero científico trata de falsarlas una a una hasta quedarse con la que mejor resista a la crítica. La crítica en cuestión puede basarse en criterios como la coherencia o la simplicidad, aunque lo más característico de la ciencia empírica es que se base en la experiencia, es decir, en observaciones y experimentos. Por último, el científico descubre que la hipótesis corroborada por la crítica genera nuevos problemas, con lo que el ciclo del progreso científico vuelve a empezar.

Esta generalización del método de ensayo y error, que a veces se ha llamado método hipotético-deductivo, implica que el progreso científico no ha de verse principalmente como persecución de la verdad, sino como huida de la falsedad. Según Popper, el científico que actúa como tal no busca verificar ni confirmar las hipótesis, sino falsarlas, desmentirlas. La discusión que mantuvieron Popper y Rudolf Carnap en la década de 1930 versaba, de hecho, sobre la alternativa confirmación-falsación. Para Carnap, la ciencia busca lo primero; para Popper, lo segundo.

Popper distinguía dos conceptos de falsabilidad. En sentido lógico, una hipótesis H es falsable, y con ello científica, si de ella se sigue algún enunciado fáctico que, de ser verdadero, falsaría H. En sentido metodológico, H queda falsada si la experiencia enseña que es verdadero alguno de aquellos enunciados fácticos. En definitiva, falsar *a posteriori* una hipótesis es distinto de —y, en general, más problemático que— demostrar *a priori* su falsabilidad.

«Todos los cisnes son blancos» es falsable porque de ella se sigue «El cisne ahí escondido es blanco», lo cual podría ser falso. Ahora bien, falsar «Todos los cisnes son blancos» no es tan sencillo. Si alguien dice que ve un cisne negro, yo puedo responder que precisamente porque es negro no puede ser un cisne. Estaría interpretando la hipótesis como si fuera una definición. Incluso admitiendo que es una hipótesis, podría objetar que lo observado es un cisne blanco manchado de ceniza. En general, si alguien declara falsada H porque la experiencia demuestra que una de sus consecuencias fácticas C es falsa, se puede responder que C no se sigue solo de H, sino de la conjunción de H con unos supuestos auxiliares (S1, S2, etcétera), de modo que la falsedad de C no implica la falsedad de H, sino de algún elemento de esa conjunción. En tercer lugar, por neutral que parezca un enunciado fáctico, contiene necesariamente términos, como «cisne», cuyo significado depende de las hipótesis en que aparece, hipótesis de cuya verdad nunca podemos estar seguros.

El historicismo de Kuhn

Kuhn se ocupa, no de la ciencia como conjunto de hipótesis junto con sus consecuencias lógicas, sino del *hacer* ciencia, una actividad humana en la cual están involucradas las teorías, pero también otros elementos. Para su estudio son necesarias la historia, la sociología, la psicología y la lingüística, sin dejar de lado el análisis lógico de teorías. Y dentro de ese quehacer científico distingue Kuhn entre ciencia normal y ciencia revolucionaria.

La primera consiste en lo que la mayoría de los investigadores hacen la mayor parte del tiempo: solucionar rompecabezas nuevos conforme a cómo se han solucionado ya antes otros semejantes. Los problemas de examen en matemáticas y física, el experimento para obtener luz a partir de una patata o la declinación de

rosa rosae son ejemplos de solución de rompecabezas. Kuhn los llamó, con gran acierto etimológico, «paradigmas», o sea, ejemplos. Pero utilizó ese mismo término en un segundo sentido, más amplio y que engloba tanto a los paradigmas en sentido restringido como a otros elementos que comparten los científicos cuando practican ciencia normal. En el epílogo de 1969 a su obra de 1962, aclaraba que un paradigma en sentido amplio comprende: generalizaciones simbólicas, modelos, valores y ejemplos.

Las generalizaciones simbólicas se corresponden hasta cierto punto con las leyes científicas. Pueden ser cuantitativas (ecuaciones de Schrödinger) o cualitativas (ley de la oferta y la demanda).

Los modelos proporcionan a los científicos analogías con que pensar la realidad, así como enseñar y difundir sus ideas, pero también innovar. Hay modelos heurísticos (pensar la dinámica de un gas como infinidad de bolas de billar en movimiento) y los hay ontológicos (creer que toda causa es anterior a su efecto).

Los valores sirven a la comunidad científica para evaluar su propia actividad. Los más importantes son internos (una medición ha de ser precisa), pero hay otros externos (la ciencia debe ser útil) [*véase* «Los valores de las ciencias», por Javier Echeverría; Investigación y Ciencia, mayo de 2014].

Los ejemplos (paradigmas en sentido restringido) son aplicaciones muy concretas de las generalizaciones simbólicas. Suelen tener la forma de resolución de rompecabezas. Muestran cómo se desciende de la teoría a la realidad, cuando, hasta Kuhn, lo normal era estudiar cómo se asciende de la realidad a la teoría con vistas a confirmarla (Carnap) o falsarla (Popper). Estos ejemplos marcan la pauta de cómo hacer ciencia.

A partir de estos conceptos, Kuhn explica el progreso científico como una sucesión de largos períodos de ciencia normal y breves episodios de ciencia revolucionaria. En la ciencia normal, el científico es algo así como un burócrata altamente especializado, cuya tarea diaria consiste en resolver rompecabezas con las herramientas del paradigma. Pero, en ocasiones, un problema no se deja solucionar y se convierte en una anomalía. Se entra entonces en un período de crisis, caracterizado por la defensa pública de paradigmas alternativos. Sigue a la crisis la ciencia revolucionaria, durante la cual los científicos no examinan la realidad a través de un paradigma, sino que examinan varios paradigmas con objeto de comprobar cuál resuelve mejor la anomalía y al mismo tiempo soluciona el mayor número de rompecabezas. Pero nunca abandonan su paradigma antes de adoptar uno nuevo. Hecha la elección, comienza otro período de ciencia normal.

Kuhn nunca precisó cuándo un rompecabezas pasa a convertirse en una anomalía, qué diferencia sus rompecabezas de los problemas de Popper, ni por qué ha de preferirse un nuevo paradigma al anterior. Se limitó a discutir casos concretos de la historia de la ciencia. Y observó que, en ocasiones, no hay algoritmo posible que decida cuál de entre dos paradigmas alternativos es preferible. Aplicando valores internos distintos, decía, se obtiene a veces que un paradigma es mejor en relación a un valor y peor en relación a otro, de modo que elegir uno u otro paradigma depende del peso relativo que en cada caso se otorgue a cada valor. De ahí el relativismo kuhniano, que, al menos, tiene la virtud de estar claramente planteado.

Progreso en teorías y entre teorías

La revolución permanente de Popper poco tiene que ver con las rutinas profesionales de Kuhn. En el falsacionismo, la ciencia



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

ESPACIO PARA EL DEBATE: El falsacionismo de Popper (*izquierda*) y el historicismo de Kuhn (*derecha*) encuentran un terreno común para la discusión filosófica cuando se preguntan qué es una teoría científica.

avanza de hipótesis en hipótesis por medio de la crítica. En el historicismo, la ciencia avanza de paradigma en paradigma a través de revoluciones. Pero sería un error enfocar el debate entre Popper y Kuhn como una discusión sociológica sobre comunidades científicas. Tampoco es una disputa historiográfica sobre si la ciencia es renovadora o conservadora. Por último, no es muy esclarecedor tomar a Popper por un idealista que prescribe cómo debe ser la ciencia y a Kuhn como un realista que describe cómo es realmente. ¿Dónde encontramos, pues, un terreno común para el debate filosófico entre ambos?

El desacuerdo concierne a lo que uno y otro entendían por teoría científica. Para verlo mejor conviene distinguir entre teoría estática y teoría dinámica. La primera es un fotograma; la segunda, una sucesión de fotogramas. La teoría dinámica persiste en el tiempo porque se compone de teorías estáticas sucesivas, las cuales contienen elementos que no pueden variar sin que la teoría pierda su identidad y otros elementos que sí pueden variar. Surgen dos cuestiones: ¿Qué elementos de una teoría dinámica la individualizan a través del tiempo? ¿Qué criterios pueden esgrimirse al comparar teorías dinámicas?

La primera cuestión se puede replantear mejor desde el modelo de Kuhn. Su paradigma en sentido amplio puede verse como una teoría dinámica. Él mismo destacó que los esquemas de generalización y los ejemplos configuran el paradigma. Así, no solo se individualiza una teoría dinámica, sino que se distingue entre progreso como cambio en una teoría dinámica y progreso como cambio entre teorías dinámicas (no nos salimos de la teoría de la evolución al incorporar el hecho de que los neandertales convivieron con los humanos modernos, pero sí nos salimos de la teoría newtoniana al decir que la simultaneidad es relativa a un marco de referencia). Aunque los modelos actuales de progreso científico conceptualizan y subdividen con mucha mayor finura esos dos tipos de cambio, estaban ya implícitos en el modelo kuhniano.

En cuanto a la segunda cuestión, si bien Kuhn tenía razón al sostener que los científicos raras veces dan por falsadas sus teorías, Popper era más convincente y preciso en sus propuestas de elección entre teorías.

Kuhn sostenía que una teoría T1 sustituida por otra T2 es «inconmensurable» con ella: no hay T3 desde donde comparar T1 y T2 para zanjar cuál es mejor. Tampoco existe un conjunto neutral de enunciados fácticos para T1 y T2. Las teorías en liza no comparten los rompecabezas que pretenden resolver, la concepción de ciencia, el vocabulario, los referentes ontológicos ni la interpretación de los hechos. Echando mano de ideas lógicas como la no traducibilidad entre lenguajes, ideas psicológicas como el cambio de Gestalt e ideas lingüísticas como la hipótesis de Sapir-Whorf (hay correlación entre las categorías gramaticales que una persona usa y su modo de entender la realidad), Kuhn llegaba a decir que, si dos científicos trabajan con teorías inconmensurables, sus esquemas perceptuales y conceptuales son tan dispares que es como si viviesen en mundos distintos. La demostración de qué teoría es mejor cede entonces a la mera persuasión.

Popper, que acabó reconociendo que no se pueden falsar hipótesis aisladas sino conjuntos de hipótesis, en 1963 propuso en *Conjectures and refutations* (*Conjeturas y refutaciones*, Paidós, 2003) seis criterios con que juzgar si T1 ha sido superada por T2: T2 hace afirmaciones más precisas que T1; T2 explica más hechos que T1; T2 explica mejor que T1; T2 ha resistido más tests que T1; T2 ha sugerido nuevos tests; T2 ha conectado problemas entre sí. No hace falta «salirse del marco», decía Popper, para discutir con alguien que está dentro de otro marco. Su propuesta contiene lagunas y fallos, pero ha inspirado otras muchas que han venido después y que no se resignan a que la elección entre teorías deje de ser racional. IyC

PARA SABER MÁS

La crítica y el desarrollo del conocimiento. Dirigido por Imre Lakatos y Alan Musgrave. Grijalbo, 1975.
Kuhn y el cambio científico. Ana Rosa Pérez Ransanz. Fondo de Cultura Económica, 1999.
El camino desde la estructura. Thomas S. Kuhn. Paidós, 2001.
Thomas Kuhn. Alexander Bird. Tecnos, 2002.
Popper. Julio Ostalé. RBA, 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

El concepto de ciencia en Popper. Andrés Rivadulla en *MyC* n.º 11, 2005.
Ciencia y arte: ¿Vidas paralelas? J. Pinto de Oliveira en *IyC*, mayo de 2011.
El universo creativo de Karl Popper. Josep Corcó en *IyC*, marzo de 2014.
Los límites del método científico. Adán Sus en *IyC*, abril de 2016.

por Madison Freeman y David Yellen

Madison Freeman es colaboradora científica en energía y política internacional en el Consejo de Relaciones Exteriores de Estados Unidos. **David Yellen** es analista del sector energético y tecnológico.





Capturemos el carbono

Para combatir el cambio climático resulta esencial atrapar el CO_2 que desprenden las chimeneas

El Acuerdo de París de 2015, en el que casi todas las naciones se comprometieron a reducir sus emisiones de carbono, debía representar un punto de inflexión en la lucha contra el cambio climático. Pero muchos países ya van con retraso a la hora de cumplir sus objetivos y EE.UU. ha anunciado que se retirará del acuerdo. Mientras tanto, las emisiones continúan aumentando a escala mundial.

El único modo de recuperar ese retraso consiste en adoptar un plan que aproveche todas las estrategias posibles para mitigar las emisiones. Las habituales, como las energías eólica, solar e hidroeléctrica, forman parte de esa iniciativa, pero también debe realizarse una fuerte inversión en captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS, por sus siglas en inglés), un conjunto de técnicas que retiran el dióxido de carbono de las chimeneas, o incluso del aire, y lo convierten en materiales aprovechables o lo almacenan en el subsuelo.

Si bien la CCUS ha sido rechazada por considerarse demasiado cara y poco ensayada, los últimos avances han aumentado sus posibilidades [*véase* «El último recurso», por Richard Conniff, *en este mismo número*]. Según un artículo publicado en *Science* en 2016, algunas mejoras, como unos compuestos químicos que atrapan el carbono con mayor eficiencia, podrían rebajar los costes de 100 dólares por tonelada de carbono capturado en 2016 a 20 dólares hacia 2025. Algunas empresas emergentes están desarrollando nuevas técnicas, como la transformación en abono del carbono atrapado, lo que disminuiría aún más los costes.

De acuerdo con la Agencia Internacional de la Energía, sin la CCUS tal vez no se consiga la reducción necesaria para mantener el calentamiento global por debajo de dos grados Celsius (el valor máximo establecido en el Acuerdo de París). Según los cálculos de la agencia, hacia 2050 la captura y el almacenamiento de carbono deberían contribuir al menos al 13 por ciento de la reducción necesaria de emisiones para frenar el calentamiento.

Tres grandes medidas de la CCUS nos llevarían a ese objetivo: reequipar las actuales centrales eléctricas para que retiren el dióxido de carbono emitido por las centrales que consumen combustibles fósiles; reducir las emisiones de las industrias que no pueden funcionar con energías renovables; y extraer carbono directamente del aire. Rebajar las emisiones de las actuales centrales eléctricas podría volverse más atractivo en el futuro si se adoptara una economía del carbono circular, en la que el carbono atrapado pudiera reciclarse y revenderse para otros usos (por ejemplo, como materia prima para fabricar hormigón o plásticos).



La CCUS también puede ayudar a reducir el carbono generado por la industria pesada, como la producción de cemento, metales refinados y sustancias químicas, que representan casi la cuarta parte de las emisiones de carbono de EE.UU. Además, la extracción directa, que captura y convierte el dióxido de carbono del aire en lugar de las chimeneas, puede contrarrestar las emisiones de aquellas industrias que no pueden implementar fácilmente otras técnicas limpias, como la agricultura.

La mera idea de la captura de carbono ha hallado una fuerte oposición: los negacionistas del cambio climático la ven como un derroche de dinero, y quienes apoyan con fervor las medidas en defensa del clima temen que se emplee para justificar una continua dependencia de los combustibles fósiles. Ambos grupos están pasando por alto la oportunidad que ofrecen los últimos avances. Si disminuyen las inversiones destinadas a la descarbonización, el mundo perderá una importante vía para reducir las emisiones tanto del sector eléctrico como de una variedad de industrias. Al generar una economía más amplia en torno del carbono, la CCUS también puede crear puestos de trabajo y beneficios a partir de lo que anteriormente solo se consideraba un material residual.

Para que se aplique la CCUS, el Gobierno de EE.UU. debe impulsar la financiación en investigación y desarrollo y ofrecer una serie de incentivos, como exenciones fiscales a los contaminantes que adopten las técnicas. En continuas ocasiones, la Administración de Trump ha tratado de recortar el programa de I+D en tecnología energética, hasta reducir un 76 por ciento los presupuestos para investigación y desarrollo de la CCUS presentados por el Departamento de Energía. Pero esa financiación debe protegerse.

Existen esperanzas de conseguirlo. La ley FUTURE, defendida por una coalición bipartita en el Senado, contiene incentivos fiscales que dan pasos importantes hacia una CCUS más rentable. El mismo grupo bipartito de senadores ha propuesto la ley USE IT, que ampliaría el apoyo a la CCUS subvencionando directamente el programa de I+D y elaborando un concurso para recompensar el despliegue de las medidas.

La transición hacia una energía limpia se ha convertido más en algo inevitable que en una mera posibilidad. Pero la capacidad de esa transición para lograr una profunda descarbonización se debilitará en ausencia de un amplio abanico de soluciones. IyC

BENJAMIN CURRIE

por Pere Castells

Pere Castells, experto en ciencia y cocina, es colaborador del proyecto Gastrocultura Mediterránea y Gastro-Ventures.



Helados

Próximos retos: más sabores y menos calorías

Los diccionarios todavía describen el helado como un alimento dulce, hecho a base de leche o zumo de frutas, que se consume frío. Sin embargo, esta definición ha quedado ya anticuada. En la actualidad podemos encontrar helados con sabores de todo tipo, dulces o salados.

La historia de los helados está llena de mitos y leyendas. A quien desee conocerla le recomiendo el artículo «El helado desde la antigüedad hasta nuestros días», publicado en *Heladería Panadería Latinoamericana* en 2015 por Gisselle Juri Morales y Juan Sebastián Ramírez-Navas, de la colombiana Universidad del Valle.

La evolución de los helados guarda una estrecha relación con el desarrollo de las técnicas de refrigeración. Asimismo, en el siglo xx la heladería profesional se benefició del desarrollo de la cristalografía aplicada a los productos alimentarios. La visualización de la estructura de los helados ha permitido innovar en su formulación y, con ello, obtener todos los sabores imaginables.

Desde el punto de vista químico, los helados corresponden a sistemas coloidales complejos, es decir, suspensiones con diversos tipos de partículas insolubles. Analicemos la función de cada uno de los componentes. Las burbujas de aire, que están cubiertas por glóbulos de grasa junto con proteínas, moderan la sensación de frío y aportan suavidad y plasticidad en la boca. La parte grasa confiere sabor, cremosidad, retención de aire y reducción de la temperatura de fusión; su exceso puede resultar perjudicial, al causar una sensación untuosa y pesada en la boca. Las proteínas favorecen la retención de aire, pero casi no aportan sabor. Las fibras desempeñan un papel estructural; favorecen la estabilidad.

Los azúcares constituyen el componente más crítico. Regulan el poder edulcorante (POD) y el poder anticongelante (PAC), factores esenciales para definir un helado. La sacarosa constituye el patrón para ambos: le corresponde un PAC de 1 y un POD de 1. Los otros azúcares más utilizados son la dextrosa (PAC 1,9; POD 0,7), el azúcar invertido (PAC 1,9; POD 1,3) y la fructosa (PAC 1,9; POD 1,7).

En heladería profesional, las formulaciones se diseñan para que puedan servirse a –11 ºC de temperatura; a ello le corresponde un PAC de entre 260 y 280. En los restaurantes, la temperatura de servicio baja a –18 ºC, por lo que el PAC debe ser superior. Teóricamente, cada 20 puntos de aumento de PAC la temperatura de servicio desciende 1 ºC. Así, para –18 ºC deberíamos tener un PAC de entre 400 y 420, lo que afecta a la proporción de sólidos (básicamente azúcares), que estarían entre el 40 y el 45 por ciento.

Esta sería la formulación teórica para 1 kilogramo de helado: 700 gramos (g) de agua (PAC 0, POD 0), 200 g de sacarosa (PAC 200, POD 200), 50 g de dextrosa (PAC 95, POD 35) y 50 g de azúcar invertido (PAC 95, POD 85). Por tanto, tendríamos un PAC de 390 y un POD de 320. La temperatura de servicio estaría entre –17 y –18 ºC.

Otro factor que incide directamente en la calidad del helado es la proporción de aire. Cuando esta es insuficiente, el helado es demasiado espeso; cuando se halla en exceso, en cambio, obtenemos una estructura de espuma y se pierde sabor. Este porcentaje se describe mediante el «incremento de volumen» (*overrun* en la terminología profesional), parámetro que se obtiene al dividir la masa inicial de la mezcla de productos calculada en un volumen fijo preestablecido (antes de la introducción del aire) entre la masa final, en el mismo volumen (después de la introducción del aire) y restarle 1. El *overrun* óptimo para un helado se halla entre el 30 y el 40 por ciento.

Y, por último, no podemos olvidar a los componentes «neutros», cuya función es equilibrar la elaboración para que el resultado final sea óptimo. Entre ellos destacan los emulsionantes (que unen el agua con las grasas) y los estabilizantes (que mantienen la estabilidad del agua unida con los elementos sólidos y dan consistencia).

La dosificación para estos componentes suele ser del 0,5 por ciento. Los más utilizados son la goma garrofín (extracto de semilla de algarrobo), los carragenatos (extractos de ciertas algas), los mono y diglicéridos (derivados de la glicerina y ácidos grasos) y la goma xantana (derivado de fermentaciones de almidón).

Además de usarse ampliamente en gastronomía, los helados también se han aplicado en tratamientos oncológicos. En 2012 se publicó en *Clinical and Translational Oncology* un trabajo dirigido por Francesc Casas, del Hospital Clínico de Barcelona, y realizado en hospitales de Terrassa y Sabadell. El estudio concluía que la ingesta de helado (emplearon una formulación con un alto contenido proteínico elaborada por el maestro artesano Angelo Corvitto) mejoraba la calidad de vida de los enfermos, disminuía su ansiedad y mejoraba su comportamiento social.

Después de ampliar la paleta de sabores, el sector heladero se centra ahora en obtener elaboraciones menos calóricas y menos dulces. Para ello se sustituyen los azúcares por polioles y las grasas por inulinas [*véase* «La inulina», por Pere Castells; Investigación y Ciencia, enero de 2019]. Estos nuevos helados tienen todavía producciones limitadas, pero se prevé que pronto ganarán protagonismo en el mercado gastronómico y alimentario.



Michael Eisenstein, con formación en genética y biología molecular, es escritor científico. Trabaja para publicaciones académicas y de divulgación.

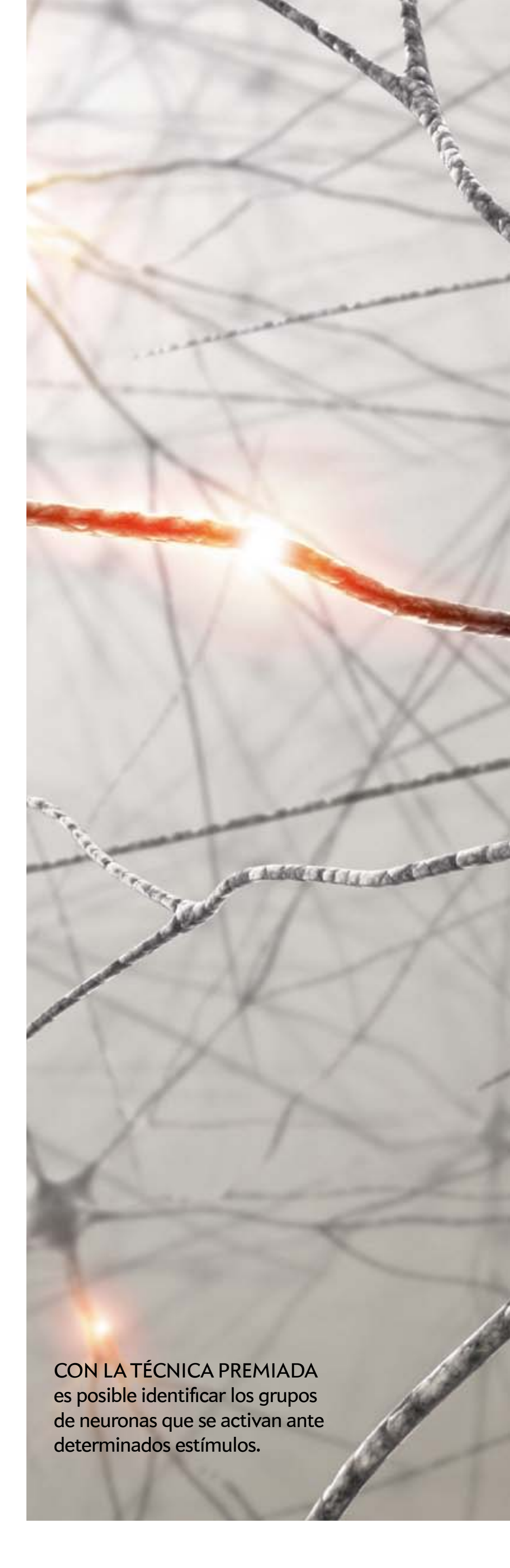



NEUROCIENCIA

OBSERVAR LAS NEURONAS DE ANIMALES EN MOVIMIENTO

Los miniscopios, diminutos microscopios de fluorescencia que se colocan en la cabeza de los animales, ofrecen una imagen clara de su actividad neuronal mientras exploran e interaccionan con el entorno. La técnica ha sido declarada método del año 2018 para la investigación biológica

Michael Eisenstein



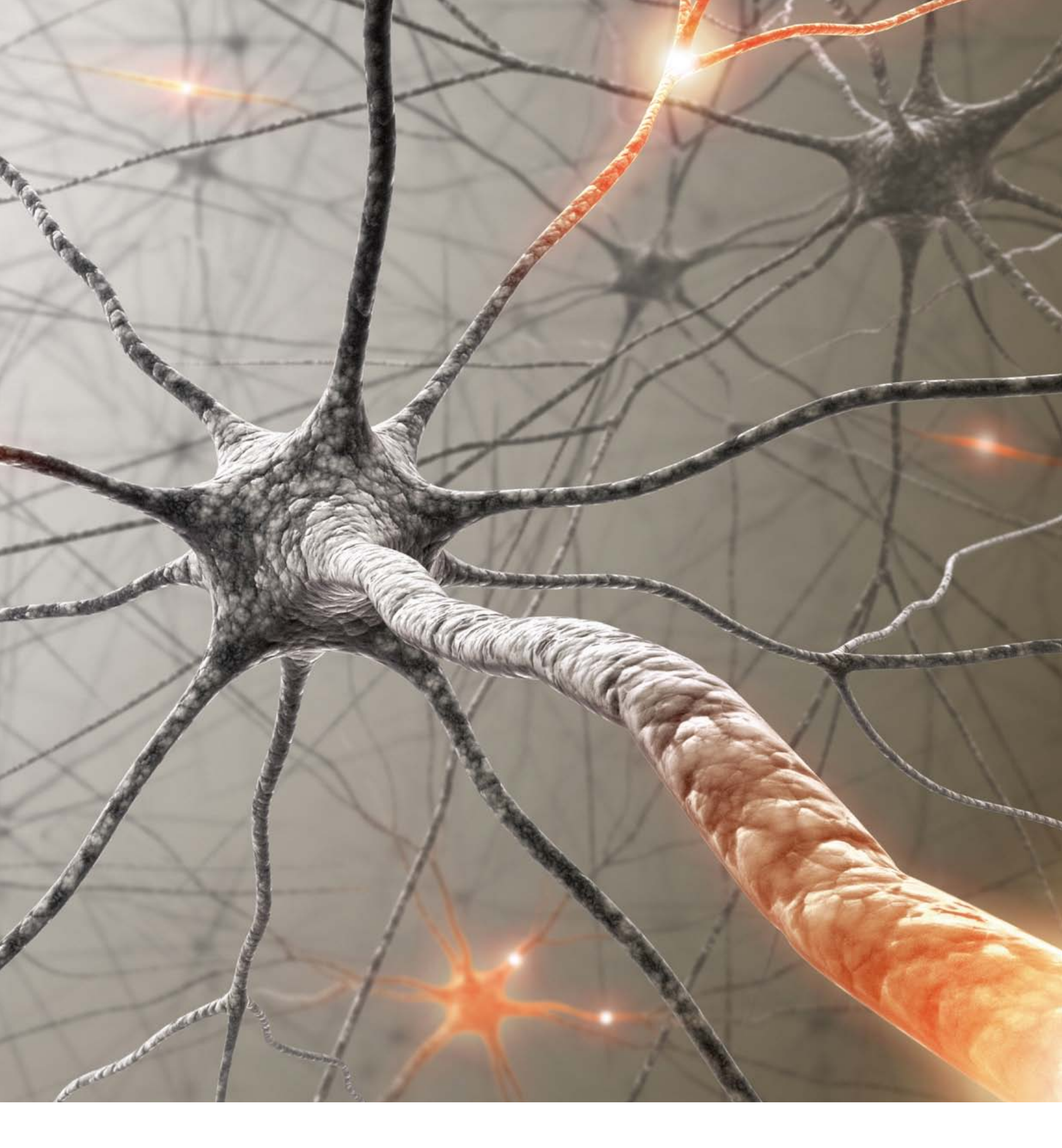
CON LA TÉCNICA PREMIADA es posible identificar los grupos de neuronas que se activan ante determinados estímulos.

EN SÍNTESIS

En los últimos años, el estudio de la actividad de grupos de neuronas ha experimentado un gran avance gracias al desarrollo de los miniscopios, unos microscopios en miniatura que, a modo de casco, se acoplan a la cabeza de los animales de experimentación.

Estos dispositivos permiten visualizar el impulso eléctrico que atraviesa las neuronas en respuesta a un estímulo mientras el animal se mueve libremente.

La técnica ofrece la posibilidad de identificar los circuitos nerviosos que se activan durante determinadas conductas y procesos, como la fijación de la memoria, y también aquellos que fallan en los trastornos neurológicos.



Los ratones de Catherine Dulac, neurobióloga de Harvard, se comportan de acuerdo con su naturaleza. Husmean sus habitáculos en busca de pistas olfativas que puedan indicarles la presencia de un familiar, un adversario o una posible pareja.

Pero, mientras los animales exploran, el equipo de Dulac monitoriza minuciosamente en ellos determinados circuitos neuronales, y sigue el progreso de su actividad mediante un bloque de instrumentos adherido al cráneo. El dispositivo, un microscopio de fluorescencia en miniatura acoplado a una lente y a una fina sonda endoscópica que se introduce en el cerebro, se ha revelado como una herramienta liberadora para los neurocientíficos, que ahora empiezan a poder relacionar la actividad neuronal con el comportamiento en el mundo real. «Las conductas sociales,

por definición, se manifiestan cuando un individuo se mueve e interactúa con otros», explica Dulac. «La nueva técnica resulta clave para captar la actividad cerebral cuando un animal realiza una tarea que uno estudia.»

Los investigadores que trabajan con roedores disponen desde hace casi veinte años de métodos para obtener imágenes in vivo de la actividad cerebral en animales despiertos. Pero estas técnicas al principio requerían inmovilizar la cabeza para conseguir una detección estable por fluorescencia. Por eficaces que fueran, las restricciones que imponían impedían llevar a cabo muchos estudios de comportamiento. «Mi laboratorio aspiraba a adentrarse en nuevas áreas relacionadas con la exploración espacial y la conducta social», comenta Peyman Golshani, de la Universidad de California en Los Ángeles (UCLA). «Nos resultaba muy difícil adaptarnos a los sistemas que exigían la inmovilización de la cabeza.»

Los rápidos e innovadores avances en el desarrollo de microscopios en miniatura permiten ahora formular preguntas fundamentales sobre el modo en que los circuitos neuronales gobiernan eventos cognitivos, conductuales y fisiológicos complejos, un paso crítico hacia la comprensión de los principios que subyacen a la organización y el funcionamiento del cerebro. Todo ello ha motivado que la técnica haya sido declarada método del año 2018 por la revista *Nature Methods*.

IMPACTO PROFUNDO

El primer aparato de esas características, un módulo que constaba de un microscopio de fluorescencia de 1,1 gramos conectado a una cámara externa a través de cables de fibra óptica, fue desarrollado en 2008 por el grupo de Mark Schnitzer en la Universidad Stanford. El dispositivo monitorizaba sin interrupción las señales generadas por sensores de calcio codificados genéticamente (un indicador indirecto que suele emplearse para medir potenciales de acción) en subconjuntos escogidos de neuronas.

Este instrumento de primera generación detectó variaciones de la actividad cerebelar en ratones, tanto en reposo como en movimiento, pero solo en un pequeño número de células y con una pobre resolución temporal. El equipo de investigadores ha logrado perfeccionarlo de forma sustancial y lo ha comercializado a través de la empresa Inscopix, con sede en Palo Alto. El trabajo de Schnitzer atrajo la atención de numerosos científicos, entre ellos Golshani, quien quedó impresionado por sus posibilidades. Sin embargo, carecía de los recursos suficientes para comprar este elemento de *hardware*, que era bastante caro. Junto con sus colaboradores de la UCLA Alcino Silva, Bhaljit Khakh y Daniel Aharoni, creó una versión casera de código abierto del dispositivo de Schnitzer. «Terminó costándonos unos de 1000 dólares», recuerda Golshani. Su grupo ha colgado gratuitamente en Internet los diseños de su «miniscopio», así como el *software* asociado (www.miniscope.org). Mientras tanto, la plataforma no ha dejado de evolucionar y se ha convertido en una popular alternativa para los laboratorios que quieran ajustar o modificar las capacidades de sus microscopios en miniatura.

Antes de la aparición de estos dispositivos, los investigadores que estudiaban el cerebro durante la vigilia contaban con dos opciones principales. Podían obtener imágenes de alta resolución de neuronas individuales realizando una microscopía de excitación de dos fotones a través de una «ventana» en el cráneo de un animal inmovilizado. O bien, podían emplear técnicas de fotometría, en las que insertaban sondas de fibra óptica en el cerebro para monitorizar la fluorescencia asociada al calcio en una determinada región del tejido neuronal mientras el animal merodeaba sin impedimentos. Sin embargo, ambos métodos presentan limitaciones. «La microscopía bifotónica transformó el campo, pero en la mayoría de los casos el comportamiento se ve restringido por la sujeción de la cabeza», comenta Anatol Kreitzer, de la Universidad de California en San Francisco. «Con la fotometría de fibra, el animal se mueve con plena libertad, pero no se consigue una buena resolución celular.»

Los microscopios que, a modo de casco, se colocan en la cabeza, presentan numerosas ventajas. Por un lado, pueden captar imágenes de casi cualquier región del cerebro. Suelen utilizarse lentes de gradiente de índice con forma de varilla que se implantan quirúrgicamente en el sitio deseado antes de conectarla al microscopio en miniatura, lo cual permite obtener imágenes claras de tejidos que de otro modo serían inaccesibles. «En teoría, podría visualizarse cualquier región del cerebro; de hecho, ya se han alcanzado estructuras profundas, como la amígdala y el hipotálamo», comenta Da-Ting Lin, del Instituto Nacional sobre Drogadicción de EE.UU. Este logro reviste especial importancia porque muchas estructuras relacionadas con el comportamiento animal residen muy por debajo de la superficie de la corteza. Una vez que se implanta la lente y se instala el microscopio, pueden observarse grandes cantidades de células durante períodos prolongados. «Estamos obteniendo imágenes de unas 200 neuronas en un momento dado, y lo hacemos con todos nuestros ratones durante varios meses», afirma Dulac.

LECTORES DE MENTE

La ventaja esencial de los microscopios colocados en el cráneo estriba en que, cuando los animales se liberan de su sujeción, resulta mucho más probable que se conduzcan con normalidad. Los experimentos en los que se inmoviliza la cabeza compensan esta restricción mediante el uso de herramientas de realidad virtual o de juegos de bolas, las cuales permiten a los ratones interactuar con su entorno. No obstante, este tipo de estrategias requieren un entrenamiento adicional y no siempre logran recoger por completo el comportamiento en el mundo real. En cambio, los microscopios en miniatura permiten llevar a cabo pruebas y diseños experimentales ampliamente contrastados en roedores. «Utilizamos lo que otras personas consideran paradigmas del comportamiento animal», explica Lin.

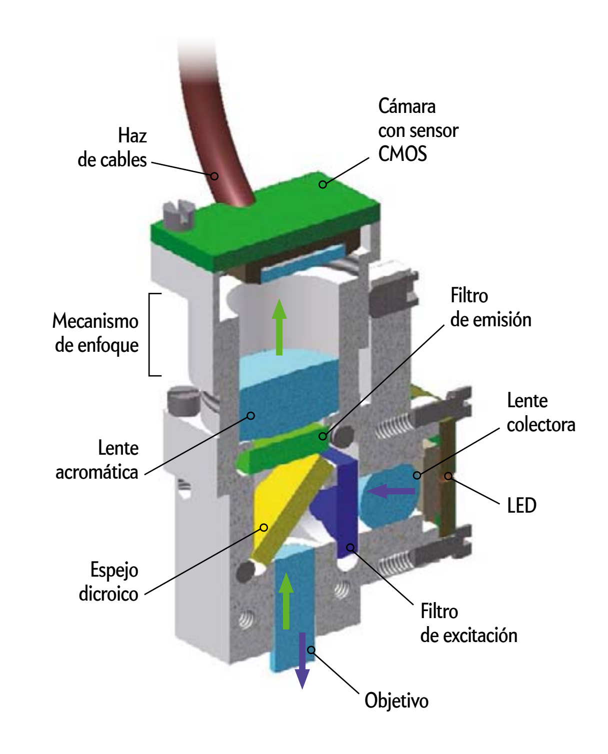
El equipo de Lin ha investigado la función motora en ratones usando el miniscopio centrándose en los circuitos neuronales que controlan el inicio y el final del movimiento. El neurocientífico subraya que, aunque en un principio la información relacionada con el movimiento se comunica a los ganglios basales a través de millones de neuronas, las señales de salida de esta estructura cerebral se transmiten posteriormente a través de un número bastante inferior, del orden de unas decenas de miles. Ello sugiere que, por el camino, o bien se descarta información, o bien se codifica de un modo más eficiente. Lin y sus colaboradores abordaron dicha cuestión al obtener imágenes de subconjuntos de neuronas del cuerpo estriado en ratones que se movían con total libertad, y luego relacionaron los datos con la tipología de los impulsos eléctricos. «Identificamos agrupamientos neuronales cuya actividad codifica información relevante para la locomoción», indica. «Podríamos incluso usar esta actividad para predecir la velocidad del movimiento.»

Como ha demostrado Dulac, esta también constituye una excelente herramienta para analizar comportamientos sociales. Su equipo empleó el instrumento de Inscopix para identificar las neuronas en la amígdala media, una estructura situada en

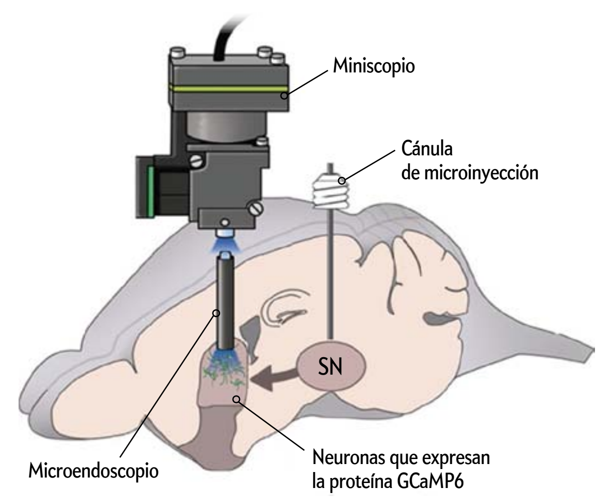
Monitorización de circuitos nerviosos

Los miniscopios se han empleado para identificar los subconjuntos de neuronas que se activan en respuesta a ciertos estímulos en ratones que se mueven libremente. Colocados a modo de casco sobre la cabeza del animal (*derecha*), estos dispositivos permiten acceder a regiones profundas del encéfalo y obtener imágenes de las neuronas implicadas en ciertas conductas o enfermedades.





En este corte transversal, correspondiente a la primera generación de microscopios en miniatura desarrollados en 2011, se observan los componentes principales del dispositivo.

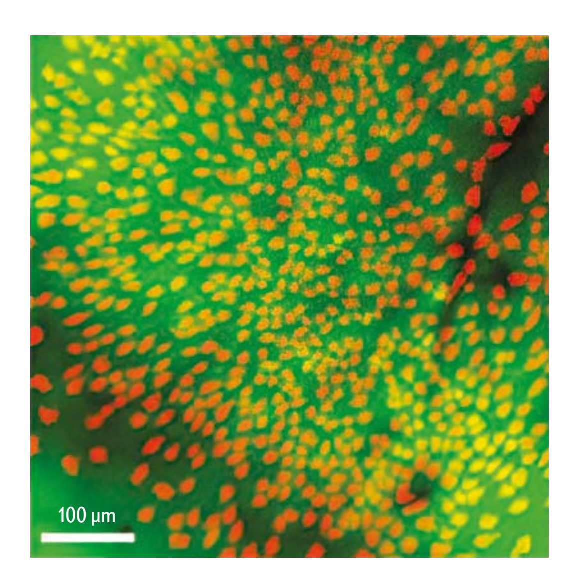


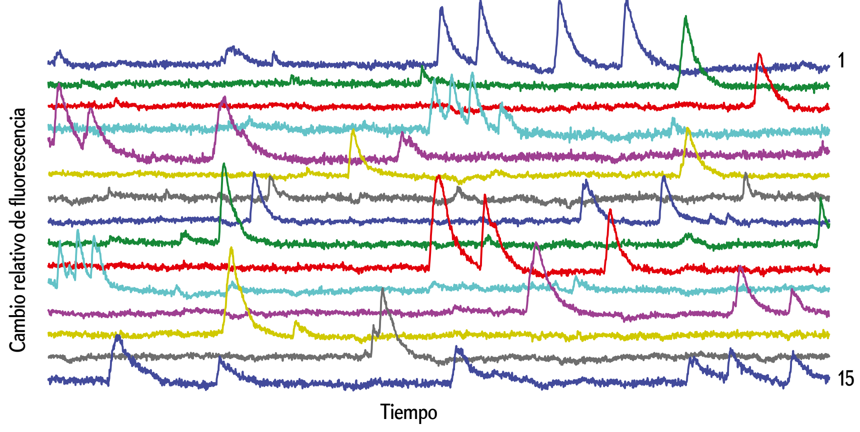
El miniscopio se acopla a un microendoscopio que se introduce en el encéfalo del ratón. Algunos investigadores lo han empleado para obtener imágenes de la actividad de las neuronas de proyección espinosas alojadas en los ganglios basales. Tras inyectar un agente químico que mata las neuronas dopaminérgicas de la sustancia negra (SN), han logrado modelar las alteraciones en la enfermedad de Parkinson. La proteína GCaMP6, un sensor de calcio genéticamente codificado, proporciona lecturas de los impulsos nerviosos en las neuronas de interés.

FUENTES: DE O. SKOCEK ET AL. EN NAT. *METHODS* VOL. 15, PÁGS. 429–432, 2018, *SPRINGER NATURE (ratón)*; DE K. K. GHOSH ET AL. EN *NAT. METHODS* VOL. 8, PÁGS. 871–878, 2011, *SPRINGER NATURE (Corte transversal del microscopio)*; DE J. G. PARKER ET AL. EN *NATURE* VOL. 557, PÁGS. 177–182, 2018, *SPRINGER NATURE (miniscopio acoplado)*

el cerebro profundo, las cuales se iluminan como respuesta a los estímulos olfativos asociados con crías jóvenes, ratones del sexo opuesto o depredadores. En un principio esperaba encontrar subconjuntos de células bien definidos que reaccionaran selectivamente a los distintos desencadenantes, pero, en su lugar, descubrió una complejidad y flexibilidad asombrosas en el modo en que se representa esta información. «La actividad de una población de neuronas proporciona la codificación precisa del estímulo concreto al que estuvo expuesto el animal. Además, advertimos diferencias entre machos y hembras», señala Dulac. Sorprendentemente, esas tendencias se veían acentuadas por las experiencias vitales; en especial, el apareamiento parecía agudizar las facultades discriminatorias. «Tras la cópula, los animales ven el mundo de modo muy distinto y continúan así durante mucho tiempo», afirma la neurobióloga. «Aunque debería decir "huelen" en lugar de "ven".» Un estudio de estas características, que depende de la monitorización prolongada de comportamientos complejos, habría sido inviable con los procedimientos que requieren la sujeción de la cabeza.

Asimismo, resulta beneficioso que los animales deambulen con libertad en los estudios sobre memoria y aprendizaje, que a menudo examinan las interacciones con entornos familiares y desconocidos. En la primera demostración publicada del miniscopio, el equipo de la UCLA utilizó el instrumento para demostrar una teoría sobre la codificación de la memoria que Silva había elaborado años atrás. «Se trata de un modelo muy específico que describe cómo vinculamos los recuerdos en el tiempo», explica. «La idea es que, cuando entra un recuerdo, se incorpora a un grupo de células que se activan con más facilidad durante un cierto período.» Ello permitiría al cerebro establecer conexiones sólidas entre sucesos que guardan una relación estrecha y reducir las probabilidades de que se construyan falsas asociaciones. Con la obtención de imágenes de las células responsables de la memoria espacial en el hipocampo de





LA IMAGEN obtenida con un miniscopio de la región CA1 del hipocampo de un ratón en movimiento (*izquierda*) revela las neuronas que se activan, asociadas a la memoria espacial (*rojo*). Se representa el cambio relativo de fluorescencia de quince de ellas (*arriba*).

ratones, Silva dotó de un soporte experimental a este modelo y demostró que los sucesos que ocurren en una sucesión más o menos rápida —en este caso, los cambios producidos en el entorno de la jaula y un estímulo inductor de miedo— se codifican con más fuerza y con una mayor superposición en el cerebro que los sucesos separados en el tiempo.

A primera vista, cabría suponer que el sueño podría estudiarse igual en un animal casi inmóvil que en uno sin ataduras, pero Yang Dan, de la Universidad de California en Berkeley, considera que este último constituye un mejor modelo para investigar la regulación del sueño y la vigilia. «Los ratones duermen mucho mejor y de forma más natural si gozan de libertad», afirma la neurocientífica. «Cuando se sujetan, necesitan mucho tiempo para habituarse.» Mediante miniscopios, su equipo ha empezado a trazar mapas de los circuitos neuronales que incitan el sueño frente a aquellos que inducen la vigilia; también los han empleado para distinguir las poblaciones de células que facilitan la transición entre las fases de sueño MOR y no MOR. Dan señala que estos distintos tipos de células a menudo se entrelazan en una determinada región cerebral, lo cual desbarató los anteriores intentos de diseccionar los circuitos del sueño. «Con las nuevas imágenes, puede observarse un montón de neuronas del mismo animal simultáneamente, por lo que resulta más sencillo hacerse una idea de su distribución espacial», concluye.

COMUNICACIONES INTERRUMPIDAS

La posibilidad de identificar los circuitos responsables del funcionamiento normal del cerebro también brinda a los investigadores un apoyo para entender qué falla en los trastornos neurológicos. «Siempre que haya un mecanismo complejo que resulte crítico y fundamental para la función cerebral, también existirá una dolencia asociada a él», sentencia Silva.

Los análisis efectuados por su equipo sobre la codificación de la memoria ya han aportado varias ideas sobre cómo el cerebro pierde la capacidad de almacenar información nueva con la edad. De esta manera, los ratones más viejos que se sometieron a la misma prueba de memoria descrita arriba no lograron establecer las sólidas asociaciones entre una determinada disposición de la jaula y la subsiguiente descarga en las patas, mientras que estas sí se formaban inmediatamente en los circuitos neuronales de sus homólogos más jóvenes. Del mismo modo, podría resultar relevante para comprender enfermedades como la demencia senil, o incluso la esquizofrenia. «Se sabe que las personas esquizofrénicas hacen asociaciones anómalas», apunta Silva. «Sospecho que los mecanismos que vinculan los recuerdos entre sí se interrumpen no solo al envejecer, sino probablemente también en los trastornos psiquiátricos.»

En ese sentido, los miniscopios también facilitan las investigaciones sobre enfermedades relacionadas con el movimiento, como el párkinson, para el que se conocen bien las estructuras cerebrales alteradas pero no la naturaleza de su disfunción. Recientemente, Schnitzer y sus colaboradores han estudiado cómo contribuyen a los síntomas de dicho trastorno dos importantes circuitos neuronales en los ganglios basales, las denominadas vías «directa» e «indirecta». Estas dos vías se contraponen para promover o inhibir el movimiento, y desde hace tiempo se baraja la hipótesis de que el deterioro que produce la enfermedad surge de un desequilibrio en la actividad de los dos circuitos debido a la pérdida gradual de las neuronas dopaminérgicas. Tras observar ambas vías en ratones y examinar sus respuestas a diferentes dosis de levodopa (el tratamiento clínico estándar), el grupo de Schnitzer dibujó un panorama más complejo. Sus hallazgos no solo confirmaban algunos aspectos del modelo existente del párkinson y aportaban nuevos detalles sobre el mecanismo de acción del tratamiento con levodopa, sino que también revelaban patrones de actividad inesperados en los dos conjuntos de neuronas. «Ello nos permitió verificar algunas ideas propuestas tiempo atrás sobre dos poblaciones entrelazadas de neuronas, las cuales no pueden diferenciarse bien con electrodos extracelulares», explica Schnitzer. Además, sus hallazgos podrían guiar la búsqueda de tratamientos de continuidad para la levodopa, que a largo plazo pierde eficacia y produce efectos secundarios motores.

En términos más generales, la posibilidad de llevar a cabo experimentos exhaustivos de neurociencia funcional en roedores podría reforzar su utilidad como modelo para trastornos neurológicos y psiquiátricos en humanos —una rehabilitación que debería haberse acometido hace tiempo, en opinión de Silva—. «Hemos acumulado una ingente cantidad de información concluyente sobre el funcionamiento del cerebro, pero, como comunidad, a menudo hemos fallado a la hora de convertir todo este conocimiento en tratamientos», explica, y añade que buena

parte de la culpa ha recaído injustamente sobre los diminutos hombros de los ratones. «Se arguye que son muy diferentes de los humanos y que no sirven para predecir con suficiente certeza si algo funcionará.» En fecha reciente, y para refutar estos argumentos, Silva y sus colaboradores han analizado los 40 medicamentos neuropsiquiátricos más vendidos y han descubierto que todos provocaban algún efecto en la conducta de los roedores.

Los modelos murinos de comportamiento nunca reflejarán a la perfección las complejas expresiones cognitivas que se perciben en los humanos, pero la capacidad de dirigirse directamente a los circuitos neuronales afectados y monitorizar su actividad podría tener un valor incalculable en la búsqueda de tratamientos más eficaces a la hora de atacar la raíz de un trastorno específico. «Es posible que estas señales dinámicas de la red proporcionen un biomarcador que se manifieste antes de que el animal muestre alteraciones funcionales», sugiere Golshani, que en la actualidad utiliza el miniscopio para evaluar modelos de autismo y epilepsia en ratones.

Y para cuestiones neurológicas cuya complejidad impide su exploración en roedores, un equipo de la Universidad de Keio liderado por Hideyuki Okano y Junichi Ushiba ha demostrado hace poco la viabilidad del instrumento de Inscopix para estudiar el comportamiento de titis despiertos. «Existen buenas razones para creer que se convertirá en una herramienta importante para entender las señales de circuitos neuronales en cerebros sanos y enfermos», afirma Schnitzer, que colaboró en el experimento piloto.

UNA IMAGEN MÁS NÍTIDA

El nuevo dispositivo se ha beneficiado de la existencia de herramientas robustas: los sensores de calcio fluorescentes, en particular una familia de proteínas diseñadas por bioingeniería conocidas como GCaMP, que los científicos del Campus de Investigación Janelia han ido perfeccionando a lo largo de los últimos diez años. «Son magníficas, y no dejan de mejorar», comenta Kreitzer, pese a que también advierte que «hay que admitir no se observa directamente la actividad neuronal». Esto no supone por necesidad un problema, ya que, por lo general, se establece una buena correlación entre las señales generadas y la activación del circuito neural. El equipo de Kreitzer ha llegado a utilizar imágenes in vivo de la actividad de GCaMP en el cerebro del ratón para caracterizar el modo en que las variaciones en los niveles de calcio neuronal contribuyen a la memoria y al aprendizaje, aparte del arraigado papel que desempeña en el inicio del impulso eléctrico.

No obstante, también ha despertado un entusiasmo considerable el desarrollo de sensores codificados genéticamente que se activan en respuesta a un cambio de voltaje en las células, lo cual proporcionaría lecturas mucho más inmediatas y precisas de los impulsos neuronales, aunque la generación actual de sensores exigirá un esfuerzo paralelo nada desdeñable en el diseño de *hardware*. «Necesitan mucha luz y cámaras sumamente rápidas», apunta Kreitzer. Varios grupos también trabajan con indicadores fluorescentes que se iluminan en presencia de neurotransmisores específicos, como la dopamina, lo cual otorgaría acceso a una comprensión más profunda de la actividad cerebral.

Por otra parte, los desarrolladores de miniscopios también se afanan en aumentar la cantidad y la calidad de los datos recogidos. Golshani ha colaborado con el investigador de la Universidad Rockefeller Alipasha Vaziri para construir un microscopio de campo de luz que genere imágenes de la actividad eléctrica de secciones tridimensionales que contienen más de 800 neuronas en animales que se comportan libremente, lo cual supone una notable mejora con respecto a las imágenes bidimensionales, de un plano, que se obtienen con los instrumentos clásicos de un solo fotón. «Nos gustaría comparar frente a frente las capas superficiales y profundas del hipocampo y ver si sus propiedades de respuesta difieren», explica Golshani. En paralelo, un grupo de la Universidad de Pekín ha demostrado que es posible realizar microscopía bifotónica con un microscopio portátil, lo que da lugar a imágenes tridimensionales nítidas y de alta resolución que en el pasado solo podían conseguirse mediante la sujeción de la cabeza.

Sin embargo, tal vez lo que mayor entusiasmo suscite provenga de la posibilidad de combinar esta técnica con la optogenética [*véase* «Control del cerebro por medio de la luz», por Karl Deisseroth; Investigación y Ciencia, enero de 2011], elegida método del año 2010, con el fin de manipular determinados circuitos cerebrales escogidos a la vez que se observan las consecuencias funcionales directas. Tanto la comunidad interesada en el miniscopio como la empresa Inscopix han creado instrumentos que permitirían la estimulación dirigida y simultánea con la captación de imágenes. «Ahora no solo puede percibirse el efecto de una manipulación sobre el comportamiento o la actividad bruta en una región del cerebro, sino también la actividad en un tipo específico de células», comenta Kreitzer, uno de los primeros usuarios del instrumento de Inscopix (y miembro del comité asesor científico de la empresa). «Creo que ese es su verdadero poder.»

En conjunto, la rápida evolución de esta técnica anuncia una nueva forma de enfocar la neurociencia desde una perspectiva funcional integrada, a nivel de sistema, en lugar de abordarla con los métodos conductuales macroscópicos o las estrategias moleculares y celulares microscópicas que predominan en la actualidad. En opinión de Silva, el objetivo radica nada más que en vislumbrar el «código fuente» del cerebro. «Tras la complejidad del universo, existen leyes muy sencillas, como "$F = ma$"», asegura. «En biología hemos de descubrirlas y conectarlas con los principios de ingeniería que lo unieron todo.»

Artículo original publicado en *Nature Methods*, vol. 16, págs. 5-8, enero de 2019. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2019

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Neuronal representation of social information in the medial amygdala of awake behaving mice. Ying Li et al. en *Cell*, vol. 171, n.º 5, P1176-1190.E17, noviembre de 2017.

High-speed volumetric imaging of neuronal activity in freely moving rodents. Oliver Skocek et al. en *Nature Methods*, vol. 15, págs. 429-432, mayo de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Microscopía bifotónica: neuronas en directo. Wolfgang Mittmann en *MyC* n.º 60, 2013.

La intrincada red de la memoria. Alcino J. Silva en *IyC*, septiembre de 2017.

SOSTENIBILIDAD

EL ÚLTIMO

¿Es posible frenar o incluso invertir el cambio climático retirando CO_2 de la atmósfera?

Richard Conniff

Fotografías de Liz Tormes



EN LA CENTRAL GEOTÉRMICA de Hellisheiði, en Islandia, unos pozos de inyección introducen en el sustrato rocoso profundo una solución salina junto con dióxido de carbono extraído del aire.



RECURSO

Richard Conniff escribe sobre ciencias naturales. Ha recibido numerosos premios y sus artículos han aparecido en *Time*, *Smithsonian*, *National Geographic* y *The New York Times*, entre otros medios.





ARECÍA QUE PARA SALVAR AL MUNDO DEL CAMBIO CLIMÁTICO BASTARÍA con reducir las emisiones de gases con efecto invernadero. Ese objetivo se conseguiría con fuentes de energía limpias, iluminación LED o comiendo menos carne, entre otros métodos. Pero dicha estrategia no ha funcionado. De hecho, las emisiones globales han aumentado. Ahora ni siquiera bastará con reducir a cero las emisiones anuales netas para 2050: los climatólogos sostienen que tendrá que haber también emisiones «negativas»; es decir, deberemos retirar de la atmósfera miles de millones de toneladas de dióxido de carbono cada año.

De acuerdo con un estudio publicado en 2018 en *Environmental Research Letters* y dirigido por Jan C. Minx, del Instituto Mercator de Investigación de los Bienes Comunales y el Cambio Climático Globales, una organización alemana, las emisiones negativas a gran escala se han convertido en una «necesidad biofísica» de la mayor urgencia si queremos limitar el calentamiento a 1,5 grados Celsius. Casi todas las naciones del planeta suscribieron ese objetivo —o, al menos, el de quedar por debajo de los 2 grados— como parte del Acuerdo de París de 2016. Actualmente, el calentamiento es de un grado por encima de los valores preindustriales, pero las temperaturas aumentan 0,2 grados por década. En un informe de octubre de 2018, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático advirtió de que puede que solo queden 12 años para actuar; luego, ya no podremos evitar que el calentamiento rebase los 1,5 grados, el valor considerado por la mayoría de los científicos como el máximo permisible si queremos preservar la vida más o menos como la conocemos.

Permanecer por debajo de ese umbral exige atenerse a un «presupuesto de carbono»; es decir, un volumen máximo de CO_2 que puede añadirse a la atmósfera sin que el calentamiento supere el umbral. Minx y sus coautores explican que, si se ma tiene el nivel actual de emisiones (entre 40.000 y 50.000 millones de toneladas anuales), «podrían quedarnos solo cinco años de emisiones de CO_2» antes de que se vuelva imposible cumplir el objetivo de los 1,5 grados. A partir de ahí, cada tonelada adicional exigiría la retirada de una cantidad equivalente. Los investigadores calculan que, para 2100, deberíamos haber extraído de la atmósfera entre 150.000 millones y más de un billón de toneladas de CO_2: entre 2000 y 16.000 millones de toneladas anuales a partir de 2050, con cifras bastante mayores a finales de siglo.

Para conseguirlo, Minx y sus colaboradores apuntan que, a partir de 2030, deberíamos empezar a construir cada año varios centenares de instalaciones de captura y almacenamiento de carbono. En principio las posibilidades van desde grandes máquinas que extraigan CO_2 de la atmósfera hasta centrales de biomasa que capturen el carbono producido y lo entierren a grandes profundidades. O, sin tanta tecnología, replantar bosques o mejorar los suelos para que atrapen más carbono. Sin embargo, la mayoría de los métodos de alta tecnología se encuentran en pañales. Requieren una elevada inversión, con un considerable riesgo de que fracasen. Tienen además importantes efectos secundarios, como la competición por una tierra que, o bien ya está en uso para alimentar a la población, o bien es un hábitat para la vida salvaje.

Con todo, la captura de carbono a gran escala parece constituir la única opción. Cuando, en un estudio publicado en *Nature Climate Change* en 2017, el estadístico de la Universidad de Washington Adrian E. Raftery y sus coautores analizaron las tendencias actuales —sin incluir las técnicas de emisión negativa—, pronosticaron un calentamiento de 3,2 grados para finales de siglo, con un margen que iba de los 2 a los 4,9 grados.

Supongamos entonces que, para este siglo, necesitaremos un billón de toneladas de emisiones negativas (una media de 20.000 millones de toneladas anuales desde 2050 hasta 2100). ¿Qué fracción de ese total podría proporcionar cada método? ¿A qué precio? Dada la competencia entre las distintas técnicas por determinados recursos, como la tierra, ¿cuál sería la combinación óptima de métodos que deberíamos adoptar?

LIMPIAR EL VIENTO

En un campo de lava solidificada cubierta de musgo, a las afueras de Reikiavik, una máquina con el tamaño de un garaje de

EN SÍNTESIS

Para limitar el calentamiento a 1,5 grados, los países tendrán que retirar de la atmósfera un billón de toneladas de CO_2 en el presente siglo.

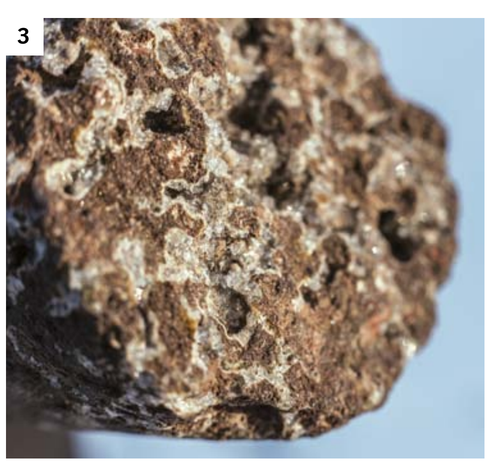
La clave consistirá en hallar la combinación óptima de métodos de captura de carbono. Las máquinas que extraen CO_2 de la atmósfera podrían retirar hasta 250.000 millones de toneladas de aquí a 2100. La replantación de bosques talados, 180.000 millones de toneladas.

Los costes netos oscilan entre 0 y 300 dólares por tonelada. A menos que se desarrollen grandes mercados de CO_2 capturado, nada apoyaría mejor a estas técnicas que un impuesto sobre el carbono.









UNA MÁQUINA de la compañía Climeworks extrae dióxido de carbono de la atmósfera (*1*). Dentro de una cúpula cercana, un inyector (*2*) envía el gas a más de 700 metros de profundidad, donde al reaccionar con el sustrato forma carbonato, visible como vetas blancas en la muestra fotografiada (*3*).

una plaza hace pasar el aire a través de un filtro químico que extrae el dióxido de carbono. La propulsa el calor residual de una central geotérmica vecina e introduce el dióxido de carbono capturado a más de 700 metros de profundidad, donde reacciona con la roca basáltica y se transforma en un mineral sólido. Climeworks, empresa suiza fundada hace unos años, dice que es la primera planta de almacenamiento y captura directa desde la atmósfera. Secuestra unas modestas 50 toneladas de dióxido de carbono al año.

La captura directa y el almacenamiento del carbono extraído sería la vía más sencilla hacia las emisiones negativas. Una batería de ventiladores y filtros capturaría CO_2 de la atmósfera para enterrarlo después. Esta técnica podría retirar entre 10.000 y 15.000 millones de toneladas de CO_2 al año hacia finales de siglo, cifras que algunos elevan hasta los 35.000 y 40.000 millones de toneladas. Se trata de una previsión tan tentadora que muchos temen que suponga un riesgo moral: ante la esperanza de una salvación tecnológica posterior, muchos podrían concluir que es posible retrasar el abandono de los combustibles fósiles.

No obstante, el examen más completo de los métodos para extraer CO_2 realizado hasta ahora, otro estudio publicado en 2018 en *Environmental Research Letters*, adopta una postura más sobria. Sabine Fuss, del Instituto Mercator, y sus colaboradores analizaron los costes, los efectos secundarios, la sostenibilidad ambiental y otros factores a fin de estimar cuánto carbono podrían secuestrar los siete métodos más importantes. Sitúan el potencial de la captura directa en entre 500 y 5000 millones de toneladas anuales en 2050 —que a finales de siglo se convertirían en 25.000-250.000 millones de toneladas—, con unos costes de entre 100 y 300 dólares por tonelada. Para hacernos una idea, un coche emite de media 4,6 toneladas anuales.

Algunos sostienen que el coste de la captura desde el aire podría quedar por debajo de los 100 dólares por tonelada. Pero si lo que se tarda en expandir la técnica se parece a los 60 años que requirieron los paneles solares desde su primer uso en satélites en los años cincuenta, la solución «podría llegar demasiado tarde», advierte Minx.

Por otro lado, la captura directa desde la atmósfera consume ingentes cantidades de energía. La extracción anual de un millón de toneladas de dióxido de carbono requeriría una central eléctrica de entre 300 y 500 megavatios, según Jennifer Wilcox, profesora de ingeniería química del Instituto Politécnico de Worcester. Si la central fuera de carbón, generaría más emisiones de las que podría retirar. Si la energía procediera de parques solares o eólicos, se cubriría una gran extensión de tierra que ya estaría solicitada para las labores agrícolas y para la naturaleza. Y, ante el objetivo de 20.000 millones de toneladas anuales, un millón de toneladas es una cantidad irrisoria.

Construir hoy plantas así podría ser esencial, ya que se desarrollarían los conocimientos necesarios para aumentar su escala a lo largo del presente siglo. «Sin embargo, levantar hoy la infraestructura necesaria para extraer 20 millones de toneladas de la atmósfera sería una forma equivocada de invertir el dinero», señala Roger Aines, científico jefe del programa energético del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore. «Consumiría una gran cantidad de energía solar y eólica. Y, si la tuviéramos, lo más inteligente sería aportarla a la red eléctrica y cerrar una central de carbón.» Hoy por hoy, la prioridad sigue siendo prevenir nuevas emisiones.

ABANICO DE PROPUESTAS

El estudio de Fuss no se limita a sumar el potencial de siete métodos para capturar carbono, ya que algunos compiten por los mismos recursos. Por ejemplo, una excesiva reforestación

Continúa en la página 68

Potencial y coste de cada técnica

¿Qué técnicas podrían secuestrar más dióxido de carbono en 2050? ¿Cuál sería su coste? Los datos proceden de un metanálisis de la economista Sabine Fuss y sus colaboradores. Los gráficos muestran la evaluación de cada técnica a partir de los trabajos analizados y de la opinión experta del equipo de Fuss.

COMPARACIÓN DE TÁCTICAS

Los rectángulos muestran los intervalos calculados por los expertos a partir de numerosos estudios.

E Captura directa desde el aire
D Meteorización
G Secuestro en el suelo
B Bioenergía
C Biochar
A Forestación

COSTE POR TONELADA MÉTRICA DE CO_2 (DÓLARES ESTADOUNIDENSES)
0 100 200 300

CO_2 POTENCIALMENTE EXTRAÍDO EN 2050 (GIGATONELADAS)
0 1 2 3 4 5 6

La escala de los gráficos individuales (*violeta*) se ha aumentado o reducido para facilitar su lectura.

CÓMO LEER LOS GRÁFICOS VIOLETAS

Las zonas coloreadas representan los intervalos de valores obtenidos según distintos estudios. Una mayor intensidad del sombreado indica una mayor coincidencia.

Coincidencia entre estudios
Carbono potencialmente retirado
Baja ⟷ Alta
Coste de la captura de carbono

Percentiles 25 y 75 de las estimaciones
Estimación de los autores del metanálisis
Las líneas rojas sirven de referencia para facilitar la comparación entre gráficos

CO_2

$0 $100 $200 $300 $400
Alto ← Coste → Bajo
0 2 4 6 8 10
Bajo ← Potencial → Alto

B

BIOENERGÍA CON CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CARBONO

Las plantas, que absorben CO_2, se queman para producir energía o se fermentan para generar combustible. El CO_2 liberado se recupera y se introduce en el subsuelo para almacenarlo de forma permanente. Reporta beneficios, pero podría invadir tierras necesarias para los cultivos.

CO_2

0 40 80 120 160 200
0 2 4 6 8

A

FORESTACIÓN Y REFORESTACIÓN

Al plantarlos para reemplazar los bosques talados o ampliar los existentes, los árboles absorben CO_2 del aire y lo convierten en nueva madera, incluidas las raíces. La técnica exigiría reformar la gestión y los mercados de la madera.

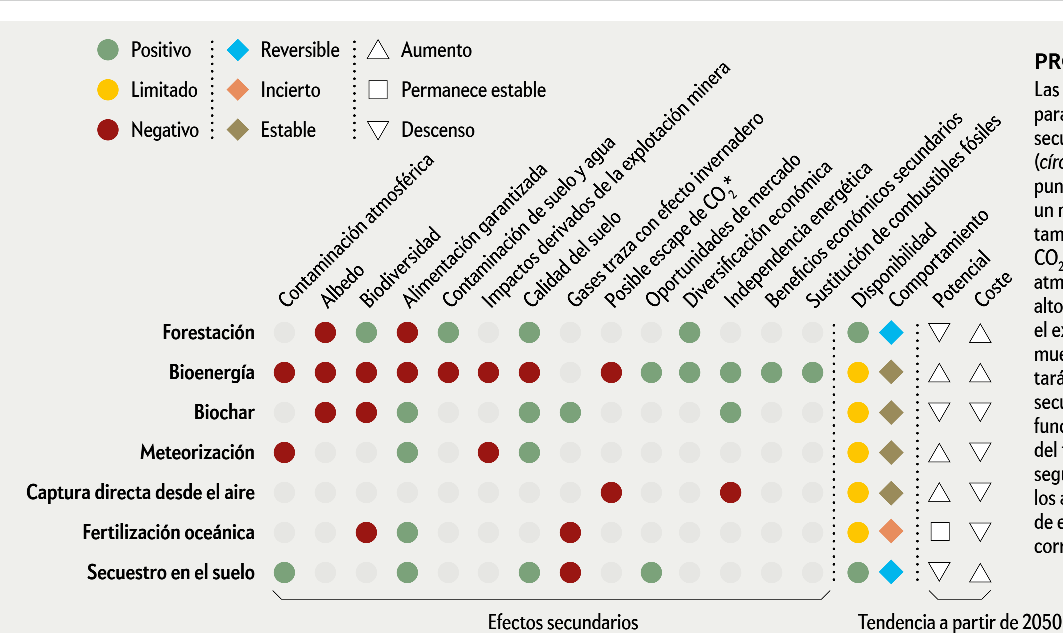
CO_2

0 40 80 120 160 200
0 2 4 6 8

C

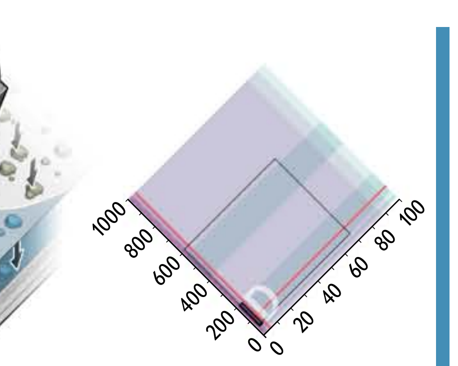
BIOCHAR

Cultivos, estiércol o residuos orgánicos se calientan en ausencia de oxígeno para generar biocombustible y biochar (un residuo con alto contenido en carbono, similar al carbón vegetal). Se los rocía en los campos para mejorar el suelo agrícola y fijar más carbono en este. Sería muy difícil producirlos a gran escala con un consumo energético mínimo.



PROS Y CONTRAS

Las técnicas de captura de carbono para 2050 (*filas*) tendrán efectos secundarios positivos o negativos (*círculos*). «Disponibilidad» indica lo a punto que podría estar un método en un momento determinado. «Comportamiento» muestra el riesgo de que el CO_2 almacenado escape de nuevo a la atmósfera: «reversible» indica que es alto; «estable», bajo (*diamantes*). En el extremo derecho (*triángulos*) se muestra si, a partir de 2050, aumentarán o descenderán el potencial de secuestrar carbono y el coste en función de factores como lo limitado del terreno. Los efectos se estiman según la valoración predominante en los artículos publicados (si el número de estos es escaso, la casilla correspondiente queda en blanco).

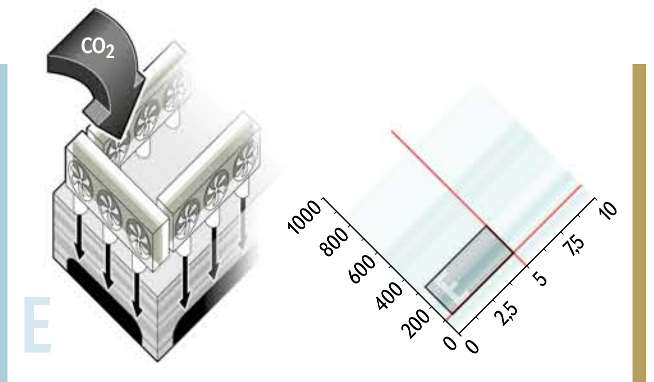


METEORIZACIÓN AMPLIFICADA

La roca se tritura hasta obtener polvo. Al aplicarlo en los campos, fija el CO_2 atmosférico y fertiliza el suelo. En el mar, reacciona con el agua y convierte el CO_2 en carbonatos que se depositan en el fondo. Lo difícil es moler y transportar la roca de forma económica.

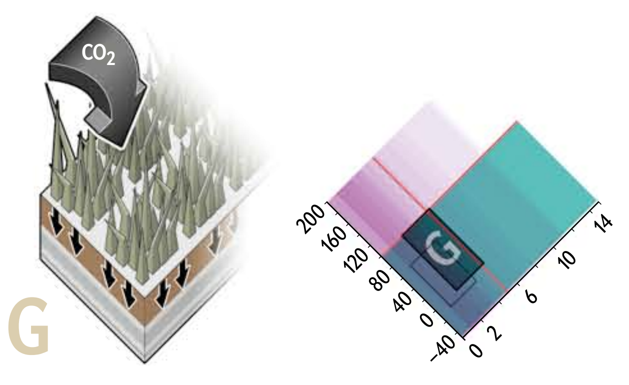
FERTILIZACIÓN OCEÁNICA

Consiste en espolvorear sobre el mar limaduras de hierro. Estas favorecen el crecimiento del plancton, que absorbe CO_2 y lo convierte en azúcares o material celular. Al morir, se hunde. Los beneficios serían pasajeros y alterar los ecosistemas resultaría arriesgado, razón por la que no aparece en el esquema conjunto (*página anterior*).



CAPTURA DIRECTA DESDE EL AIRE

Unas máquinas extraen aire ambiental, separan químicamente el CO_2 y lo inyectan en el subsuelo para almacenarlo de forma permanente. Se prevén costes elevados, pero el desarrollo técnico podría reducirlos. (Los datos referentes al carbono potencialmente retirado no se hallaban disponibles.)



SECUESTRO DE CARBONO EN EL SUELO

Las plantas herbáceas y los cultivos incorporan en sus raíces el CO_2 que absorben, lo que fija carbono en el suelo. La gestión del suelo incrementaría el secuestro de carbono y el rendimiento de las cosechas. El potencial a largo plazo sería limitado, ya que los suelos solo pueden retener una determinada cantidad de carbono.

FUENTE: «NEGATIVE EMISSIONS—PART 2: COSTS, POTENTIALS AND SIDE EFFECTS», SABINE FUSS ET AL. EN *ENVIRONMENTAL RESEARCH LETTERS*, VOL. 13, N.º 6, ART. N.º 063002; JUNIO DE 2018; PITCH INTERACTIVE (*gráficos*); BEN GILLILAND (*ilustraciones*)

Viene de la página 65
ocuparía terrenos necesarios para el cultivo del combustible empleado en las centrales de bioenergía. Y la excesiva producción de bioenergía competiría con la captura directa por el secuestro del carbono en el subsuelo.

Según Pete Smith, profesor de ciencias del suelo y cambio global de la Universidad de Aberdeen, una forma de comenzar consistiría en ampliar los métodos ya conocidos: «Sabemos plantar árboles. Sabemos recuperar turberas elevando el nivel freático [con lo que capturan el dióxido de carbono en lugar de emitirlo]. Sabemos aumentar el contenido en carbono del suelo. Incentivar ese tipo de acciones es [relativamente] sencillo y se podría hacer de modo inmediato. Adelantaríamos parte del camino», apunta.

Los bosques tropicales del planeta se han convertido, a medida que se talan y se queman o a medida que las áreas devastadas se descomponen, en fuentes de CO_2 en vez de ser sus sumideros. Transformar de nuevo los bosques en territorios de emisiones negativas requeriría, en primer lugar, importantes reformas en el mercado internacional de madera, muy influido por el comercio ilegal. Los lugares más obvios para la reforestación son los terrenos que se talaron con fines agrícolas o de pastoreo pero que más tarde se abandonaron por su improductividad. La restauración de cinco millones de kilómetros cuadrados secuestraría 3700 millones de toneladas de CO_2 al año si se dispusiera de la financiación adecuada, según un estudio publicado en 2015 en *Nature Climate Change* y dirigido por Richard Houghton, del Centro de Investigación de Woods Hole.

Reconvertir todos los pastizales en los antiguos bosques que una vez fueron podría generar hasta 10.000 millones de toneladas de emisiones negativas al año, según Bronson Griscom, director de ciencias de carbono forestal de la organización internacional The Nature Conservancy y autor principal de un estudio sobre las «soluciones climáticas naturales» publicado en la revista *PNAS*. Ello supondría una considerable fracción de la extracción total de CO_2 que se necesita anualmente. Sin embargo, requeriría un cambio global hacia un menor consumo de carne, una tendencia opuesta a la actual.

Fuss y sus coautores pronostican un potencial más modesto. Los árboles viven y mueren. Por tanto, el carbono que acumulan hoy lo liberarán de nuevo a lo largo del siglo actual o del siguiente. Probablemente, conforme los bosques maduren y crezcan más despacio, la cantidad de dióxido de carbono que secuestren también disminuirá. Los incendios forestales, la deforestación y el cambio climático elevan los riesgos. Aun así, la expansión de los bosques podría suponer un recurso temporal de la mayor importancia mientras se expanden la captura directa y otras técnicas. Fuss sitúa su potencial entre 500 y 3600 millones de toneladas de CO_2 retirado anualmente hacia 2050, lo que supondría entre 25.000 y 180.000 millones de toneladas para el objetivo de un billón de toneladas en este siglo, con un coste de entre 5 y 50 dólares por tonelada.

No obstante, una gestión más eficiente podría elevar los beneficios. Griscom señala que, en el sureste de EE.UU., se han talado deliberadamente pinos taeda varios años antes de que alcanzaran sus condiciones óptimas. Permitir vender créditos de carbono para financiar los años adicionales de crecimiento ayudaría a retrasar la tala hasta que los árboles alcanzaran la edad óptima; así se obtendría más madera y se almacenaría más carbono.

Cultivar plantas que fijen nitrógeno en los pastizales y adoptar en ellos sistemas de rotación más inteligentes aumentaría tanto la productividad del suelo como su capacidad para almacenar carbono. Según las prudentes estimaciones de Fuss, ello permitiría el secuestro de hasta 5300 millones de toneladas al año (265.000 millones a lo largo del siglo) con unos costes de entre 0 y 100 dólares por tonelada.



ABONO DE BIOCHAR obtenido a partir del calentamiento de residuos de pollo y trozos de madera. De otro modo, dichas sustancias habrían liberado dióxido de carbono al descomponerse.

JEFF HUTCHINS, GETTY IMAGES

Y eso se sumaría al biochar, o «biocarbón». En esta forma de retirada del carbono, un horno calienta biomasa en ausencia de oxígeno y la convierte en una forma de carbón vegetal. El proceso también genera subproductos útiles, como el bioóil o el gas sintético. Cuando se aplica el carbón vegetal en los campos de cultivo, fija el carbono en el suelo y puede mejorar el rendimiento de las cosechas. Sin embargo, todavía nadie ha intentado emplear biochar a gran escala. Fuss y sus coautores lo consideran un método factible que podría retirar entre 300 y 2000 millones de toneladas de CO_2 al año (un total de entre 15.000 y 100.000 millones de toneladas en todo el siglo) con un coste de entre 90 y 120 dólares por tonelada.

Otro método basado en la tierra es la llamada bioenergía con captura y almacenamiento de carbono. Las estrategias iniciales de muchos países para cumplir sus compromisos de París dependen de esta técnica, aunque es muy polémica. En una central eléctrica se queman madera, residuos agrícolas u otro tipo de biomasa, como el *Panicum virgatum* o pasto varilla, una planta forrajera. Estos recursos retiran dióxido de carbono de la atmósfera a medida que crecen. Cuando el carbono se libera de nuevo al quemarlos, la central eléctrica lo recaptura en la chimenea y lo inyecta en el subsuelo para almacenarlo de modo permanente en formaciones geológicas profundas. Sin embargo, la reforestación destinada a la producción de biocombustible, aplicada a la escala sugerida por algunos de sus defensores, acapararía buena parte de las tierras cultivables del planeta, lo que pondría en riesgo la producción de alimentos y la conservación de la naturaleza. Y también perjudicaría a la retirada del dióxido de carbono por otros medios, como la reforestación o el secuestro de carbono en el suelo. La captura de las emisiones en las chimeneas también reduce drásticamente la eficiencia de las centrales eléctricas, al menos con las tecnologías actuales. Por tanto, Fuss sitúa el rendimiento sostenible de la bioenergía con captura y almacenamiento en tan solo 2000 millones de toneladas anuales, muy por debajo de lo previsto por otros, y con un coste que oscila entre 100 y 200 dólares por tonelada. Según sus estimaciones, el proceso aportaría 100.000 millones de toneladas de emisiones negativas hacia 2100.

Quedan por considerar otros dos métodos de captura de carbono. La meteorización amplificada aprovecha un proceso natural: el dióxido de carbono atmosférico se transforma en carbonato al exponerse a determinados tipos de roca triturada. El objetivo consiste en acelerar ese proceso natural, pero hay que hallar un método barato de pulverizar las rocas adecuadas. Fuss sitúa su potencial entre 2000 y 4000 millones de toneladas al año, con un coste de entre 50 y 200 dólares por tonelada. Por último, su equipo concluye que la fertilización oceánica, consistente en rociar el océano con hierro y otros nutrientes para estimular la producción de algas y otros tipos de plancton que absorben dióxido de carbono, sería un recurso demasiado ineficiente y efímero como para justificar sus consecuencias negativas en los ecosistemas. «Se trata de una estrategia inviable para obtener emisiones negativas», afirman.

BENEFICIOS EN LUGAR DE COSTES

¿Qué conclusión sacamos de estas cuentas? Los intervalos del estudio dirigido por Fuss van desde unos meros 150.000 millones de toneladas retiradas hasta algo más de un billón para 2100. Parecería que el último de estos números resuelve el problema, pero hay conflictos entre los métodos. Como dice Fuss, hay que aprovechar los solapamientos beneficiosos. Por ejemplo, la meteorización amplificada podría aplicarse en los mismos terrenos donde se cultive la biomasa para la generación de bioenergía con captura y almacenamiento de carbono.

Todos estos métodos requieren enormes inversiones en investigación y desarrollo. Sin embargo, los Gobiernos se han mostrado reacios a costear las tecnologías de emisiones negativas debido a una resistencia ideológica a «escoger a los ganadores» y a que algunas inversiones pasadas derivaron en fracasos notorios. Por ejemplo, el Departamento de Energía de EE.UU. ha gastado enormes sumas de dinero en proyectos de captura de carbono para la generación de energía a partir de «carbón limpio». La compañía eléctrica Southern Company abandonó su última tentativa en 2017 y reconvirtió la central de carbón limpio de Kemper County, en Misisipi, en una de gas natural tras haber gastado 7500 millones de dólares.

La aplicación de un impuesto sobre el carbono evitaría escoger ganadores. Supondría un incentivo económico tanto para reducir las emisiones actuales como para, más adelante, retirar las del pasado. Reino Unido introdujo un impuesto de ese tipo, actualmente de unos 25 dólares por tonelada, que aplicó sobre todo a las centrales eléctricas que empleaban combustibles fósiles, y las emisiones por el carbón se redujeron a la mitad entre 2015 y 2016. La mayoría de los Gobiernos, sin embargo, consideran el impuesto como una medida demasiado drástica para una economía basada en los combustibles fósiles.

Salvo contadas excepciones, las grandes empresas también se han mostrado reacias a invertir en técnicas de extracción de CO_2, puesto que, hasta hace poco, no les veían mercado. Sin embargo, la situación podría estar cambiando gracias a un paquete de incentivos fiscales, sorprendentemente bipartidista, aprobado por el Congreso de EE.UU. a comienzos de 2018. La llamada legislación 45Q amplía los créditos fiscales que pueden solicitar las compañías en los próximos 12 años, no solo para capturar el dióxido de carbono y almacenarlo en el subsuelo (a 50 dólares por tonelada en créditos fiscales), sino también para darle al CO_2 distintos usos.

Su empleo en la «extracción de petróleo ampliada» es el más controvertido. Una empresa petrolera compra dióxido de carbono, lo transporta por medio de un gasoducto y lo inyecta en pozos vacíos para forzar la salida de un crudo que ya no puede extraerse con los métodos tradicionales. La adopción de una solución climática que implique la producción de *más* combustibles fósiles puede sonar orwelliana. Sin embargo, parece que la extracción de petróleo ampliada reduce las emisiones actuales, ya que el dióxido de carbono capturado, normalmente procedente del gas natural o las refinerías de etanol, permanece almacenado en el subsuelo. Algunos ecologistas, como Kurt Waltzer, de la iniciativa Aire Limpio, argumentan que transformar la captura de carbono en una tecnología energética, antes que en una tecnología de emisiones, supone el primer paso hacia una comercialización generalizada de la retirada de dióxido de carbono. El CO_2 recapturado se convertiría en un producto que se compra o se vende en lugar de en uno cuyo coste hay que afrontar. Ahí podría radicar la clave de las emisiones negativas.

HORA DE EMPEZAR

¿Nos permitiría un abanico de métodos de captura de carbono, impuestos y mercados alcanzar el objetivo del billón de toneladas hacia 2100? El más que caluroso verano de 2018 puede haber sido un punto de inflexión. En un artículo publicado en la revista *PNAS*, un grupo de climatólogos no se anduvo por las ramas. El autor principal, Hans Joachim Schellnhuber, director emérito del Instituto de Investigación sobre el Impacto del Clima, en Potsdam, se lo explicó así a los periodistas: los efectos en cascada podrían conducir a un mundo capaz de mantener a tan solo mil millones de seres humanos, en vez de a uno con 7500 millones.

A algunos dirigentes políticos el cambio climático les sigue pareciendo incierto pese las abrumadoras pruebas de que constituye nuestro aciago presente y nuestro aún más aciago futuro. Lo desconcertante de las técnicas de emisiones negativas es que hasta los propios científicos consideran inciertos muchos de sus aspectos.

«Puede que la cuestión se haya centrado demasiado en la escala final», opina Brendan Jordan, del Instituto de las Grandes Llanuras, en Minneapolis. «Me temo que nos paraliza, y no nos podemos permitir ninguna parálisis.» Es decir, deberíamos empezar ya con las emisiones negativas a pesar de las incertidumbres, dado que estas resultan triviales comparadas con un mundo donde se detiene el juego de sillas del cambio climático y faltan asientos para 6500 millones de personas. IyC

PARA SABER MÁS

Natural climate solutions. Bronson W. Griscom et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 114, n.º 44, págs. 11.645-11.650; 31 de octubre de 2017.

Negative emissions—Part 2: Costs, potentials and side effects. Sabine Fuss et al. en *Environmental Research Letters*, vol. 13, n.º 6, artículo n.º 063002; junio de 2018.

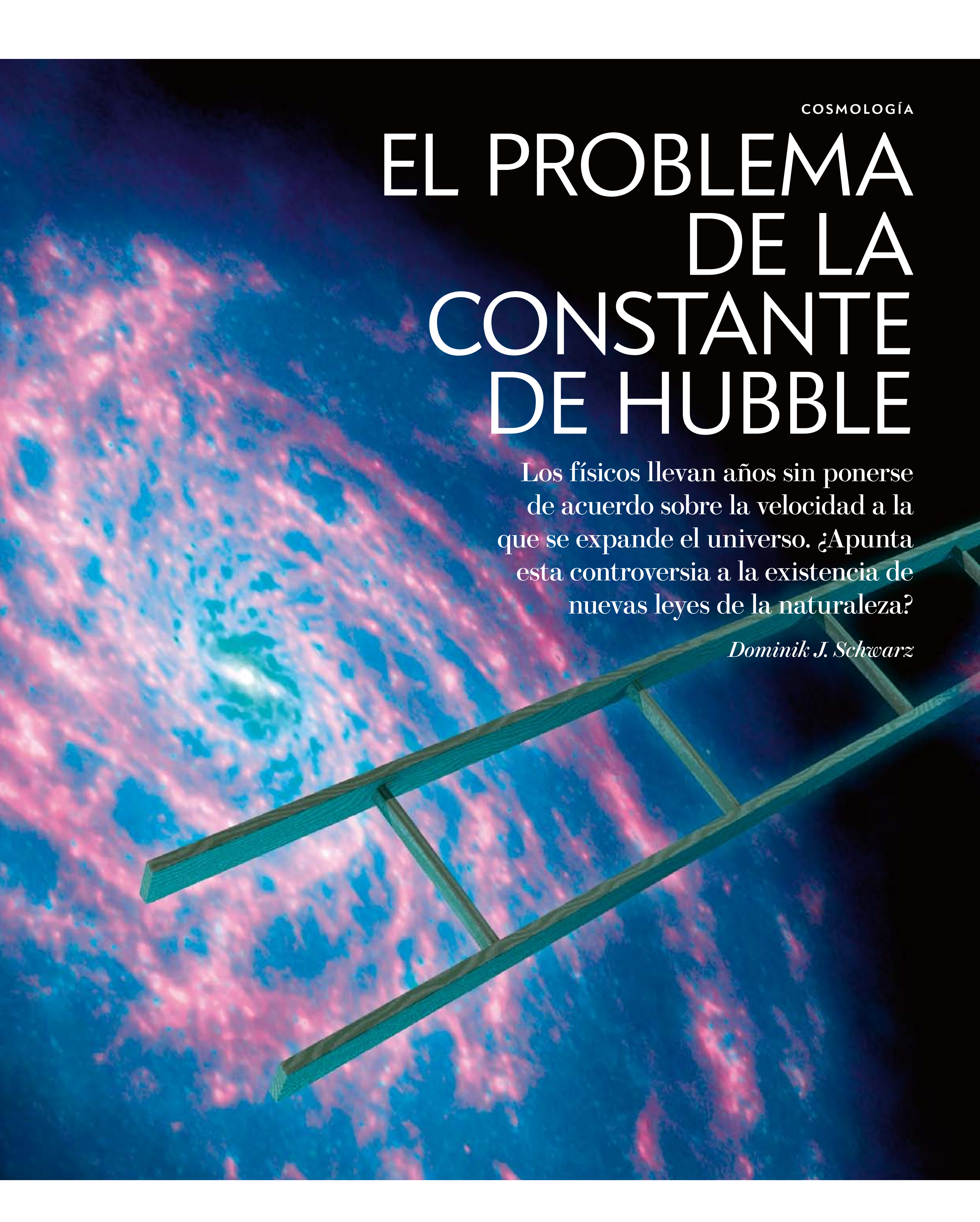
Technological carbon removal in the United States. James Mulligan et al. Instituto de Recursos Mundiales; septiembre de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Una solución integral al carbono. Steven L. Bryant en *IyC*, enero de 2014.

La falacia de la captura de carbono. David Biello en *IyC*, marzo de 2016.

Secuestro de carbono en los suelos forestales. Pere Rovira en *IyC*, marzo de 2017.



COSMOLOGÍA

EL PROBLEMA DE LA CONSTANTE DE HUBBLE

Los físicos llevan años sin ponerse de acuerdo sobre la velocidad a la que se expande el universo. ¿Apunta esta controversia a la existencia de nuevas leyes de la naturaleza?

Dominik J. Schwarz



PARA ESTIMAR EL RITMO al que se expande el cosmos actual, los investigadores deben calcular con precisión la distancia a la que se encuentran las galaxias distantes, un problema particularmente difícil. Un método para lograrlo se basa en la «escalera de distancias cósmicas», una serie de técnicas concatenadas que permiten medir longitudes astronómicas cada vez mayores.

EN SÍNTESIS

La constante de Hubble indica a qué velocidad se expande el universo. Desde hace algunos años, métodos diferentes arrojan valores dispares sobre el valor de este parámetro fundamental de la cosmología.

Uno de esos métodos se basa en la observación de galaxias relativamente cercanas. Otro se apoya en los datos del fondo cósmico de microondas, la radiación emitida poco tiempo después de la gran explosión.

Cada vez parece menos probable que alguno de los equipos haya cometido un error. Antes bien, la discrepancia parece apuntar a alguna fisura en los modelos empleados por los cosmólogos para describir el universo.



Dominik J. Schwarz es catedrático de la Universidad de Bielefeld. Su trabajo se centra en diversos aspectos de la cosmología y la física de astropartículas.

Albert Einstein fue sin duda uno de los científicos más importantes del siglo xx. Buena prueba de ello es que hasta sus errores rezumaban sabiduría. El ejemplo más célebre probablemente se remonte a 1917, poco después de que presentase su teoría de la relatividad general. En aquel momento, Einstein estaba examinando sus famosas ecuaciones de campo en busca de una solución que describiese el cosmos como un todo.

Sin embargo, todos los universos que encontraba sobre el papel parecían destinados a acabar derrumbándose sobre sí mismos. Eso le llevó a añadir un nuevo término en sus ecuaciones: uno que incluía lo que hoy conocemos como «constante cosmológica». Gracias a ella, la teoría albergaba soluciones que describían un universo tal y como lo concebían los eruditos de la época: estático e inmutable y que, por tanto, existía desde siempre y para siempre.

Parece que más adelante Einstein se arrepintió de su idea e incluso se refirió a ella como «la mayor metedura de pata» de su vida. La constante cosmológica acabaría resurgiendo en 1998, cuando los investigadores descubrieron el misterioso fenómeno de la energía oscura. Pero, hace un siglo, todo apuntaba a que Einstein se había equivocado. Poco después de su propuesta, el astrónomo estadounidense Edwin Hubble se propuso investigar la cuestión con ayuda de telescopios. Y, a finales de los años veinte, Hubble y otros investigadores concluyeron que el universo no era estático, sino que se expandía. Aquel hallazgo marcó el nacimiento de la cosmología moderna. De la tasa de expansión cósmica da cuenta un parámetro conocido como «constante de Hubble».

Hoy sabemos que el valor de dicho parámetro ronda los 70 kilómetros por segundo y por megapársec (km/s/Mpc). Eso significa que dos galaxias que se encuentren a una distancia de un megapársec (una longitud equivalente a unos 3,26 millones de años luz) se separarán a una velocidad de unos 70 kilómetros por segundo, y que dos galaxias que se hallen al doble de distancia se alejarán una de la otra al doble de velocidad.

Pero ¿cuál es el valor preciso de la constante de Hubble? ¿A qué ritmo se expande el universo actual? Varias generaciones de astrofísicos han abordado esta cuestión con instrumentos cada vez mejores; sin embargo, hasta hoy no han logrado ponerse de acuerdo. La disputa sobre el valor exacto de este parámetro fundamental de la cosmología perdura hasta hoy, lo que ha llevado a algunos de mis colegas a debatir la cuestión con especial intensidad. Ello se debe a que distintos equipos han usado técnicas diferentes para medirla y han hallado valores dispares. La situación es delicada. ¿Está alguno de esos métodos pasando por alto un detalle importante? ¿O hemos dado por fin con un rastro que podría conducirnos a descubrir nuevos fenómenos físicos?



EDWIN POWELL HUBBLE (1889-1953) destacó por su clasificación de las galaxias. En 1929 efectuó una primera estimación de la velocidad a la que se expande el universo. Casi un siglo después, el valor exacto de dicho parámetro sigue siendo objeto de debate entre los cosmólogos.

EXPANSIÓN INCIERTA

Al hablar de la constante de Hubble con legos en la materia, los cosmólogos solemos enfrentarnos al problema de cómo proporcionar una imagen visual de un universo en expansión. A mí me gusta explicarlo de la siguiente manera: si observamos la evolución de un volumen que contiene un gran número de galaxias, veremos que este crecerá con el paso del tiempo. A modo de ejemplo, podemos pensar en una masa de levadura con pasas que se hincha cuando la introducimos en el horno. Las pasas se alejan unas de otras porque, gracias a la levadura, la masa que hay entre ellas se expande. Y dos pasas situadas en extremos opuestos de la masa se alejarán una de otra a mayor velocidad que dos pasas adyacentes y situadas en el centro, ya que entre las primeras hay más material en expansión. Nuestro universo lleva hinchándose de manera similar desde la gran explosión.

Sin embargo, esta ayuda visual no es totalmente correcta. A diferencia de un pastel, el universo es infinitamente grande, a pesar de lo cual todas las distancias crecen con el tiempo. Algo así resulta difícil de imaginar, pero es lo que nos dicen las ecuaciones de la cosmología. Por otro lado, al fenómeno de la expansión cósmica hemos de añadir el hecho de que las galaxias pueden moverse en el espacio, lo cual complica las cosas.

PÁGINAS ANTERIORES: NASA/JPL-CALTECH; WIKIMEDIA COMMONS/DOMINIO PÚBLICO/JOHAN HAGEMEYER (1884-1962) (*E. P. Hubble*)

Además, es fácil malinterpretar el significado de la constante de Hubble. Esta proporciona una medida de lo rápido que se expande el universo *hoy*. No obstante, ese ritmo ha ido cambiando con el tiempo. A pesar de ello, hablamos de una «constante» ya que, en la actualidad, su valor debería ser aproximadamente el mismo en todo el cosmos. Tras ello se encuentra la suposición de que las leyes de la naturaleza son idénticas en todo el universo y que, a grandes escalas, este no presenta direcciones ni lugares privilegiados; una hipótesis conocida como «principio cosmológico».

¿Cómo podemos medir la expansión de nuestra levadura cósmica si el universo visible abarca distancias de decenas de miles de millones de años luz? Por supuesto, no es posible extender reglas gigantescas, esperar algunos millones de años y repetir el ejercicio. Por tanto, el método tradicional consiste en medir la distancia a la que se encuentran las galaxias que vemos en el firmamento, así como la velocidad de recesión de cada una de ellas.

La velocidad a la que se mueve una galaxia con respecto a la Tierra puede determinarse con relativa facilidad gracias al análisis de su espectro. Si una galaxia se aleja de nosotros, las líneas de absorción y de emisión características de su espectro se desplazarán hacia longitudes de onda más largas debido al efecto Doppler; en consecuencia, su luz parecerá «más roja» de lo que cabría esperar. Por el contrario, la luz de una galaxia que se acerque a nosotros sufrirá un corrimiento hacia la parte azul del espectro.

Si todas las galaxias que vemos desde la Tierra se moviesen en direcciones aleatorias, observaríamos tantos espectros desplazados hacia el rojo como hacia el azul. Sin embargo, ya hacia 1920, el astrónomo estadounidense Vesto Melvin Slipher constató que los espectros de casi todas las galaxias presentaban un corrimiento hacia el rojo, no hacia el azul. Eso implica que las galaxias del firmamento se están alejando de nosotros, a excepción de unas pocas situadas en las cercanías de la Vía Láctea.

Edwin Hubble fue quien primero determinó la distancia a numerosas galaxias cercanas. También tomó nota del desplazamiento hacia el rojo de cada una de ellas y representó los datos de distancias y velocidades en una gráfica. Al astrónomo le pareció que era posible conectar los puntos de aquel diagrama con una recta, por lo que dedujo una relación lineal entre la distancia y la velocidad: cuanto más alejada se encontraba una galaxia, proporcionalmente más rápido parecía alejarse de la Tierra. Aquello supuso un primer indicio de que, en efecto, la «masa de levadura cósmica» se expande entre las galaxias.

La pendiente de la recta en el diagrama de Hubble indica cómo cambia la velocidad de una galaxia con su distancia; es decir, se corresponde con la constante que hoy lleva su nombre. En 1929, Hubble obtuvo un valor de 500 km/s/Mpc. Al extrapolar esa tasa de expansión hacia atrás en el tiempo, Hubble incluso logró deducir la edad del universo. Su cálculo arrojó la cifra de unos 2000 millones de años, muy desviada de las estimaciones actuales (13.800 millones de años). De hecho, a partir de las desintegraciones radiactivas y de la proporción de distintos isótopos en las rocas, los geólogos de la época ya especulaban con la posibilidad de que la Tierra fuese mucho más vieja. Sin embargo, no fue hasta los años cincuenta cuando los astrónomos se percataron de que Hubble había cometido varios errores al calcular las distancias.

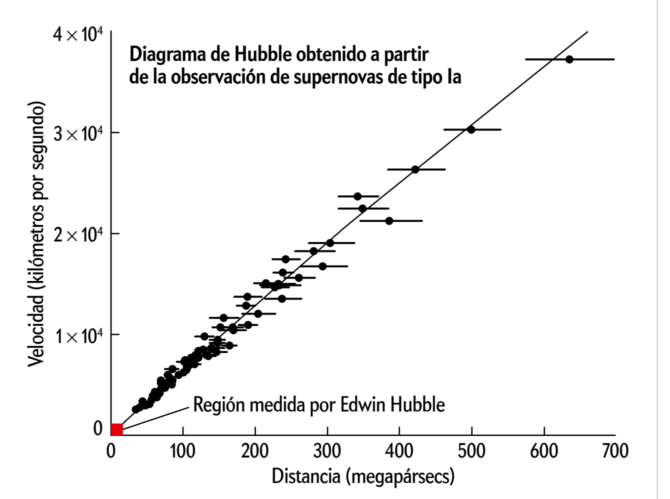
A lo largo de estos decenios se han producido numerosos debates acerca del verdadero valor de la constante de Hubble. Gracias a las mejoras en los telescopios y los métodos de análisis, así como a una comprensión más profunda de la física de las estrellas y las galaxias, los astrónomos han podido medir

DIAGRAMA DE HUBBLE

Distancias y velocidades cósmicas

Las ecuaciones de la teoría de la relatividad general de Einstein permiten describir el universo como un todo. Gracias a ellas, es posible calcular la velocidad con que la energía liberada en la gran explosión «estira» el cosmos cuando este contiene una determinada cantidad de materia. Dicha expansión afecta a cada parte del universo, por lo que todas las distancias son cada vez mayores. Durante los 13.800 millones de años que han transcurrido desde su inicio, el ritmo de expansión del cosmos ha cambiado. Por un lado, la densidad de materia, la cual tiende a oponerse a la expansión debido a la atracción gravitatoria, es cada vez menor. Por otro, la enigmática energía oscura, que aparece en las ecuaciones de Einstein en forma de una constante (la «constante cosmológica»), causa que el universo se expanda cada vez más rápido.

El diagrama de Hubble (*figura*) ilustra cómo cambia la velocidad de expansión con la distancia a la Tierra. Cada punto del diagrama corresponde a una galaxia para la que es posible determinar tanto la distancia a la que se encuentra como la velocidad a la que se aleja de nosotros. Si consideramos distancias de hasta unos cientos de megapársecs, los puntos experimentales pueden ajustarse mediante una línea recta. Su pendiente es la constante de Hubble, la cual indica el ritmo de expansión del universo actual y cuyas unidades son el cociente de las unidades de velocidad y distancia; es decir, kilómetros por segundo y por megapársec. A distancias mayores puede apreciarse que la velocidad de expansión comienza a cambiar. A partir de ahí el diagrama de Hubble solo puede ajustarse mediante una curva; la constante de Hubble es la pendiente de la tangente en el origen de coordenadas.



la expansión del universo de manera cada vez más precisa. En 1956 la cifraron en 180 km/s/Mpc; en 1958 en 75 km/s/Mpc y, en los años setenta, en 55 km/s/Mpc. Eso arrojaba una edad del universo superior a los 10.000 millones de años, mucho más cercana al valor aceptado en la actualidad. No obstante, tales mediciones eran aún muy poco precisas. En los años sesenta, el error estadístico era del orden del 100 por cien, lo que significaba que no podía descartarse que la constante de Hubble valiese el doble. En los años noventa, los astrónomos aún debatían si su valor era de 50 o de 90 km/s/Mpc.

La primera medición clara llegó de la mano del célebre telescopio espacial Hubble, cuyo nombre ilustra una vez más la importancia del legado del astrónomo en nuestra comprensión del universo. Con la ayuda de este instrumento en órbita alrededor de la Tierra, los investigadores calcularon en 2001 que la constante de Hubble ascendía a unos 72 km/s/Mpc, con un error de unos 8 km/s/Mpc; es decir, del 11 por ciento [*véase* «La constante de Hubble y el universo en expansión», por Wendy Freedman; Investigación y Ciencia, junio de 2004].

ESCALERA DE DISTANCIAS

Determinar la constante de Hubble exige resolver un problema fundamental: a diferencia de lo que ocurre con las velocidades de las galaxias, las cuales pueden determinarse con facilidad, hoy por hoy sigue siendo muy difícil medir distancias en el universo. Para ello existen diversos métodos. El más simple de todos lo proporciona la triangulación, la técnica que tradicionalmente han usado navegantes, topógrafos y astrónomos.

En el caso de las estrellas, este método consiste en determinar la paralaje: el cambio aparente en la posición angular de una estrella cuando la Tierra describe la mitad de una órbita alrededor del Sol. Dado que la distancia entre la Tierra y el Sol es bien conocida, ello permite deducir la separación entre la Tierra y la estrella a partir de una determinación precisa del ángulo. Los mapas de nuestro vecindario estelar se basan en este método. Hace poco, la misión Gaia, de la Agencia Espacial Europea, ha usado mediciones de este tipo para determinar las posiciones precisas de más de 1300 millones de estrellas de la Vía Láctea [*véase* «El primer mapa 3D de la Vía Láctea», por Carme Jordi y Eduard Masana, *en este mismo número*].

EXPLOSIÓN CÓSMICA: En 1994 se iluminó un punto brillante (*abajo a la izquierda*) en el borde de la galaxia NGC 4526, situada a 55 millones de años luz de la Tierra. Se trataba de una supernova de tipo Ia. Los astrónomos emplean estas explosiones estelares como «candelas estándar»: siempre emiten la misma cantidad de luz, por lo que su brillo aparente permite calcular la distancia a la que se encuentran.

La triangulación solo puede usarse en el interior de la Vía Láctea. Sin embargo, reviste gran importancia, puesto que sienta las bases para la medición de distancias mayores: si conocemos muy bien una longitud astronómica, podemos usarla a modo de «regla cósmica» con la que medir distancias cada vez mayores. Los astrónomos comparan este procedimiento con la ascensión por una escalera: para subir por ella, debemos irnos apoyando en los peldaños que tenemos debajo. La paralaje de las estrellas cercanas constituye el primer escalón. A partir de la distancia a una estrella, podemos deducir su luminosidad intrínseca (la cantidad de luz que emite el astro), dado que sabemos que la intensidad de una fuente disminuye con el cuadrado de la distancia. Eso significa que, si consideramos dos estrellas idénticas situadas a 10 y 20 años luz de distancia, la primera nos parecerá cuatro veces más brillante que la segunda.

Por otro lado, una de las herramientas más usadas en astrofísica, el diagrama de Hertzsprung-Russell, relaciona la luminosidad de una estrella con su tipo espectral (con su color, por así decirlo). Este puede determinarse a partir de ciertas líneas de emisión características, incluso si la estrella se halla demasiado lejos para medir su paralaje. Ello permite determinar la distancia a una estrella dada comparando el brillo que medimos con la luminosidad intrínseca que corresponde a su tipo espectral, dada por el diagrama de Hertzsprung-Russell. Este es el segundo peldaño de la escalera de distancias cósmicas, el cual proporciona resultados aceptables para objetos situados en la Vía Láctea y sus galaxias satélite.

A distancias aún mayores, recurrimos a las llamadas «candelas estándar», el tercer escalón. A esta categoría pertenecen varios tipos de cuerpos celestes, todos los cuales guardan dos características en común: podemos identificarlos con claridad incluso cuando se encuentran lejos, y sabemos con exactitud cuánta radiación emiten. Tal vez el ejemplo más conocido sea un tipo poco frecuente de estrellas, las cefeidas, las cuales se hinchan a lo largo de varios días o semanas y luego vuelven a contraerse, lo que causa que su brillo varíe de forma periódica. En las cefeidas, el período de pulsación se encuentra directamente relacionado con la luminosidad intrínseca media del astro. Y, dado que gracias al diagrama de Hertzsprung-Russell conocemos la distancia a algunas cefeidas relativamente cercanas, podemos estimar también su luminosidad real. Por tanto, el período de pulsación de una cefeida nos permite calcular su distancia aunque se encuentre demasiado lejos para efectuar una medición de la paralaje.

Otro tipo de candelas estándar son las supernovas de tipo Ia. Estas violentas explosiones estelares se producen en sistemas binarios en los que, según creemos, uno de sus miembros es una enana blanca que poco a poco absorbe material de la estrella compañera. De esta manera, la enana blanca va ganando masa hasta que, cuando alcanza unas 1,4 masas solares, estalla en forma de supernova. Dado que la cadena de procesos físicos es siempre la misma, existe una relación bien definida entre la duración de la fase más brillante de la supernova y su luminosidad real. Una vez que la luz de una explosión estelar de este

ESTRELLAS VARIABLES: Otro tipo de candelas estándar son las cefeidas, estrellas cuyo brillo cambia periódicamente con el tiempo y para las que existe una relación entre el período de pulsación y la luminosidad intrínseca media. Esta imagen muestra la cefeida RS Puppis, a 6200 años luz de la Tierra. Su brillo muestra variaciones cada pocas semanas, llegando a caer hasta la quinta parte del valor máximo.



tipo llega a la Tierra, los astrónomos pueden determinar a qué distancia ocurrió el evento.

La resurrección de la constante cosmológica de Einstein se debe a este tipo de muertes estelares. Hasta 1998-99, los físicos daban por sentado que el universo se expandía a un ritmo cada vez menor (ya que la atracción gravitatoria entre galaxias debería ir frenando poco a poco la expansión cósmica). Aquellos años, sin embargo, gracias a un ingenioso plan de observación de este tipo de supernovas, dos equipos descubrieron que la velocidad relativa entre galaxias distantes parecía estar aumentando con el tiempo. El misterioso causante de ese comportamiento es la energía oscura, un agente de naturaleza desconocida y que, en nuestras ecuaciones, queda representado por la constante cosmológica de Einstein. En 2011, Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt y Adam Riess recibieron el premio Nobel de física por este descubrimiento.

Desde entonces, los astrofísicos y los cosmólogos han medido con una precisión cada vez mayor todos los peldaños de la escalera de distancias. Además, en cada uno de ellos han desarrollado distintos métodos para mantener bajo control los errores sistemáticos de las medidas. Ello les ha permitido determinar la constante de Hubble con una incertidumbre de apenas el 2,4 por ciento. En 2016, la colaboración SH0ES, liderada por Riess, encontró el valor de 73,24 ± 1,74 km/s/Mpc. Algo después, con los datos más recientes de Gaia y con imágenes del telescopio espacial Hubble, el mismo grupo logró acotar el valor a 73,52 ± 1,62 km/s/Mpc.

LENTES GRAVITATORIAS

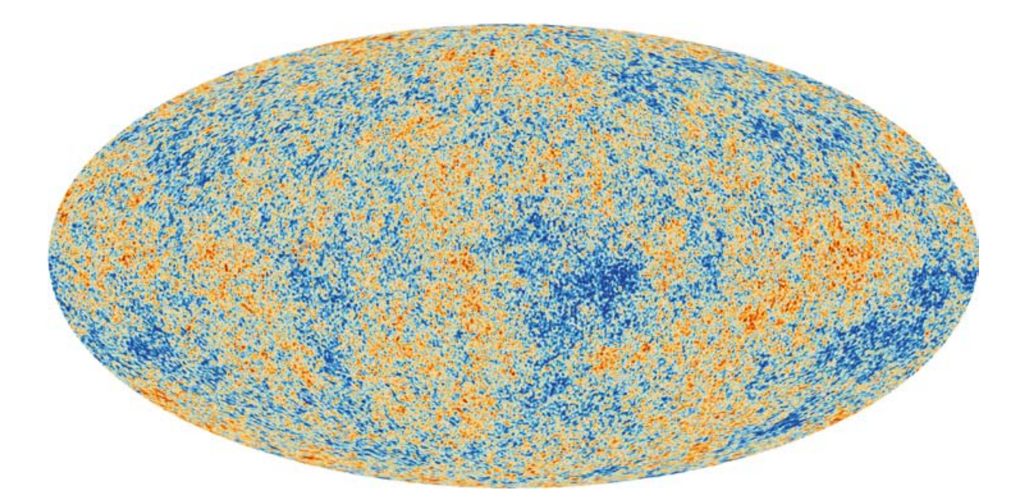
El resultado de Riess y sus colaboradores encaja bien con el de un segundo método de medición que ha despertado un notable interés en los últimos años. La idea consiste en observar fuentes variables en el tiempo, como núcleos galácticos activos, con ayuda de lentes gravitatorias. Con este nombre los astrofísicos se refieren a objetos muy masivos, como cúmulos de galaxias, que se hallan interpuestos en la línea de visión entre la Tierra y la fuente que estamos estudiando. La gran masa de la lente deforma el espaciotiempo, lo que provoca que los rayos de luz procedentes de la fuente se curven. Bajo ciertas condiciones pueden llegar a verse múltiples imágenes de la misma fuente, ya que su luz rodea al cúmulo por distintos sitios. Como consecuencia, este se comporta como una lente que focaliza los rayos.

Este fenómeno cobra especial interés cuando el brillo de la fuente lejana varía, como ocurre en el caso de los núcleos galácticos activos conocidos como cuásares. Si la lente gravitatoria se encuentra próxima al camino más corto entre la fuente y el observador, se producen varias imágenes cuyo parpadeo no parece simultáneo según se ve desde la Tierra. En su lugar, se observa un cierto desfase, ya que los rayos asociados a cada imagen recorren caminos de longitudes diferentes.

En última instancia, esos desfases pueden usarse para calcular la distancia a la fuente. Junto con su desplazamiento al rojo, este método permite determinar la tasa de expansión del universo a partir del examen de objetos muy distantes. Usando esta técnica, el proyecto H0LiCOW obtuvo en 2017 un valor para la constante de Hubble de 71,9 + 2,4 – 3,0 km/s/Mpc, el cual presenta una incertidumbre de apenas el 4 por ciento y se halla en buen acuerdo con el resultado que arroja la escalera de distancias cósmicas.



LENTES GRAVITATORIAS: Cuando una gran acumulación de masa se interpone entre la Tierra y un cuásar distante, pueden verse múltiples imágenes del objeto debido a la curvatura de los rayos de luz. Este fenómeno es uno de los empleados para obtener una estimación de la constante de Hubble.



UNIVERSO NACIENTE: El fondo cósmico de microondas (*imagen*) es un tesoro para los cosmólogos. Equivale a una instantánea del universo en el momento en que se formaron los primeros átomos neutros, una época en la que el cosmos apenas tenía 380.000 años, el 0,003 por ciento de su edad actual. El valor de la constante de Hubble inferido a partir de las propiedades de esta radiación difiere de manera sustancial del obtenido por otros métodos.

ESA/COLABORACIÓN PLANCK

EL FONDO CÓSMICO DE MICROONDAS

Si solo pudiéramos determinar la tasa de expansión del universo a partir de las dos técnicas mencionadas hasta ahora, la historia probablemente acabaría aquí. Sin embargo, hace ya un tiempo que disponemos de otro método muy preciso y que, además, desempeña un papel especial en cosmología. Se trata del empleado por el equipo del satélite Planck, lanzado por la Agencia Espacial Europea para medir con suma precisión las propiedades del fondo cósmico de microondas, la radiación emitida muy poco tiempo después de la gran explosión. En los últimos años, esta técnica ha arrojado un valor para la constante de Hubble significativamente menor: 66,88 ± 0,91 km/s/Mpc, con un margen de error del 1,3 por ciento.

El descubrimiento del fondo cósmico de microondas constituye uno de los grandes hitos de la cosmología moderna. Fue efectuado en 1964 por Arnold A. Penzias y Robert W. Wilson, quienes 14 años más tarde recibirían por ello el Nobel de física. Este fondo de radiación difusa baña todo el cielo y es nada menos que un resplandor residual de la gran explosión. Se originó unos 380.000 años después del nacimiento del universo, cuando este, en rápida expansión, se había enfriado lo suficiente para que los protones y los electrones pudieran combinarse en los primeros átomos de hidrógeno neutros. Aquello provocó que, de pronto, el cosmos se tornase transparente: la radiación electromagnética, que antes era absorbida por el plasma tras viajar cortas distancias, comenzó a propagarse libremente por el universo.

Cuando Penzias y Wilson detectaron el fondo de microondas, este parecía mostrar las mismas propiedades en todo el cielo, con independencia de la dirección en que se observase. Su espectro era el de un cuerpo negro con una temperatura de 2,7 grados Kelvin. En 1992, sin embargo, el satélite COBE, de la NASA, detectó pequeñas fluctuaciones en la radiación de fondo: su resplandor era ligeramente más intenso en algunos lugares del cielo y algo menos en otros. Tales fluctuaciones corresponden a diferencias de temperatura del orden de diezmilésimas de grado. No obstante, revisten tanta importancia que sus descubridores, John C. Mather y George F. Smoot, fueron galardonados en 2006 con el premio Nobel. Esos pequeños cambios de temperatura reflejan las variaciones de densidad en el universo primitivo, las cuales quedaron inmortalizadas en el fondo cósmico de microondas. Como consecuencia, este puede entenderse como una fotografía del universo temprano: una tomada mucho antes de que se encendieran las primeras estrellas.

Unos 380.000 años después la gran explosión, sobre la materia caliente del universo actuaban tanto la gravedad como la presión ejercida por la radiación. Como consecuencia, el plasma se concentraba en algunos lugares mientras que en otros se hallaba más diluido. Esas fluctuaciones se propagaron por el cosmos a gran velocidad en forma de ondas de presión y de densidad, de manera similar a como las ondas sonoras se propagan por el aire; por esa razón, reciben el nombre de «oscilaciones acústicas bariónicas». A partir de las irregularidades de la radiación de fondo, los investigadores pueden reconstruir cuáles de esas oscilaciones predominaban en aquellos momentos. A su vez, ello permite derivar varios parámetros clave, como la curvatura espacial del universo o las densidades de materia ordinaria y materia oscura.

Esos modos de oscilación permiten también calcular el valor de la constante de Hubble. Para ello, a partir de la física atómica del hidrógeno y el helio (los únicos elementos químicos relevantes en aquella época), los cosmólogos deducen la temperatura a la cual la sopa primordial de partículas se tornó transparente a la radiación. Dicha temperatura resulta ser de unos 3000 grados Kelvin. Después, a partir de las densidades de materia ordinaria y materia oscura obtenidas previamente, calculan la edad que tenía entonces el universo y el tamaño característico de las oscilaciones acústicas bariónicas predominantes en aquella época. Eso permite deducir la longitud típica de las estructuras cósmicas que se esconden tras las manchas de la radiación de fondo que vemos hoy. Esa escala de distancias proporciona la «vara de medir» de la cosmología del fondo de microondas [*véase* «La sinfonía cósmica», por Wayne Hu y Martin White; Investigación y Ciencia, abril de 2004]. Dado que conocemos el ángulo que subtienden en el firmamento actual las manchas asociadas a ese tamaño, un cálculo sencillo permite deducir a qué distancia de la Tierra se liberó en su día la radiación de fondo.

Para determinar la constante de Hubble, aún falta relacionar esa distancia con el desplazamiento al rojo de la radiación. Para ello, se compara la temperatura del universo 380.000 años después de la gran explosión con su temperatura actual. Por último, dado que conocemos la relación teórica entre la distancia y el desplazamiento al rojo, es posible calcular la constante de Hubble actual a partir de dichos valores y del resto de los parámetros cosmológicos.

Resulta impresionante la cantidad de información que puede extraerse a partir del fondo cósmico. Sin embargo, ese camino

es complejo e incluye numerosas suposiciones sobre el universo primitivo, por lo que cabe preguntarse por la robustez del valor de la constante de Hubble obtenido con esta técnica. En este sentido, otros grupos que han analizado las propiedades del fondo cósmico han obtenido resultados divergentes.

Tal es el caso del Telescopio del Polo Sur. Este instrumento instalado en la Antártida goza de una mayor resolución angular que el satélite Planck; sin embargo, observa una parte más pequeña del cielo, por lo que las fluctuaciones de densidad a escalas grandes no entran en su análisis. Sus datos han arrojado un valor de la constante de Hubble mucho más cercano al calculado con la escalera de distancias cósmicas. No obstante, al examinar la fracción de datos comunes a Planck y al Telescopio del Polo Sur, se obtienen resultados similares. Como consecuencia, parece poco probable que alguno de estos dos grupos haya cometido un error de calado en su análisis.

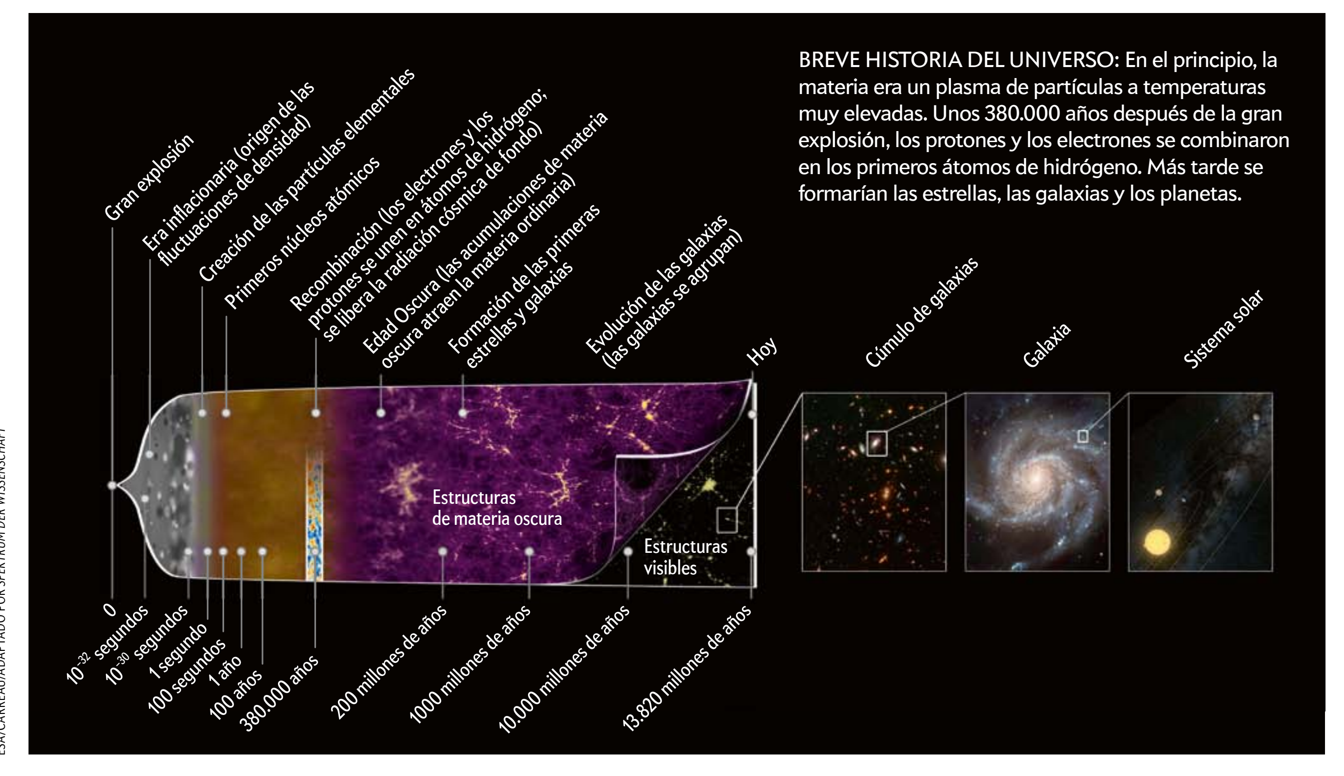
Al mismo tiempo, los miembros de la colaboración Planck argumentan que es posible obtener un valor semejante al suyo siguiendo un camino distinto. Las huellas de las oscilaciones acústicas bariónicas no aparecen solo en el fondo cósmico de microondas. Pueden también observarse, enormemente ampliadas debido a la expansión del universo, en la distribución a gran escala de las galaxias actuales, tal y como han mostrado algunos ambiciosos cartografiados celestes efectuados durante los últimos años, como el Sondeo Digital del Cielo Sloan. A partir de tales mediciones, un equipo liderado por Graeme E. Addison, de la Universidad Johns Hopkins, ha obtenido un valor de la constante de Hubble de 66,98 ± 1,18 km/s/Mpc, muy cercano al calculado por la colaboración Planck e independiente de él. Por tanto, argumentar que Planck sencillamente habría pasado algo por alto se antoja demasiado simplista.

UNA DISCREPANCIA PROFUNDA

Así pues, nos hallamos ante dos conclusiones enfrentadas: por un lado, quienes han usado la técnica de la escalera de distancias cósmicas y otros métodos para calcular la constante de Hubble han obtenido un valor de entre 72 y 75 km/s/Mpc; por otro, quienes han examinado el fondo cósmico de microondas y la estructura a gran escala del universo han hallado un resultado entre 5 y 8 km/s/Mpc menor. A primera vista, no parece que ambos valores se encuentren tan alejados, sobre todo si comparamos la situación con las anteriores controversias sobre la constante de Hubble. Sin embargo, un examen detallado revela lo profunda que es la discrepancia: aunque todos los equipos han buscado durante años errores sistemáticos en sus resultados, los valores no se muestran compatibles dentro de sus respectivos márgenes de error. ¿Quién tiene razón?

No hay duda de que cada método adolece de sus puntos débiles. En el caso de las técnicas basadas en el fondo cósmico de microondas, uno de ellos es que las conclusiones dependen de los postulados del modelo cosmológico estándar. Así, elegir un modelo alternativo para describir la energía oscura —en lugar de la inmutable constante cosmológica— repercutiría directamente sobre la constante de Hubble. Por su parte, el método basado en observar núcleos galácticos activos mediante lentes gravitatorias sufre el mismo problema. Además, tales resultados dependen de los detalles del modelo usado para la lente, los cuales es necesario introducir ya que no conocemos con exactitud la distribución de masa en los cúmulos de galaxias distantes.

Las mediciones directas basadas en la escalera de distancias no exigen hacer este tipo de suposiciones relacionadas con el modelo cosmológico. Sin embargo, no está claro que arrojen resultados válidos para todo el universo, ya que solo determinan el valor de la constante de Hubble «aquí y ahora». Cuando observamos galaxias distantes, en cambio, estamos mirando al pasado, ya que su luz ha tardado un tiempo considerable en llegar hasta nosotros; por tanto, habrá sido emitida en un momento en el que el cosmos se expandía a un ritmo distinto. Ello implica que, en el diagrama de velocidades y distancias mencionado más arriba, no podemos ajustar los datos mediante una línea recta



BREVE HISTORIA DEL UNIVERSO: En el principio, la materia era un plasma de partículas a temperaturas muy elevadas. Unos 380.000 años después de la gran explosión, los protones y los electrones se combinaron en los primeros átomos de hidrógeno. Más tarde se formarían las estrellas, las galaxias y los planetas.

ESA/CARREAU/ADAPTADO POR *SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT*

cuando consideramos volúmenes de varios miles de millones de años luz. Solo esperaríamos obtener una relación lineal si el universo se hubiera expandido siempre al mismo ritmo. Pero, debido a la energía oscura, sabemos que la tasa de expansión cósmica ha estado aumentado con el tiempo.

En todo caso, debería ser posible conectar los puntos del diagrama de Hubble mediante una curva que, dependiendo del modelo de universo, vire hacia arriba o hacia abajo. La constante de Hubble en nuestro entorno cósmico inmediato vendrá dada entonces por la pendiente de la tangente a esa curva a distancia cero. La pendiente de la tangente a otras distancias proporcionará el valor del parámetro de Hubble para épocas cósmicas anteriores.

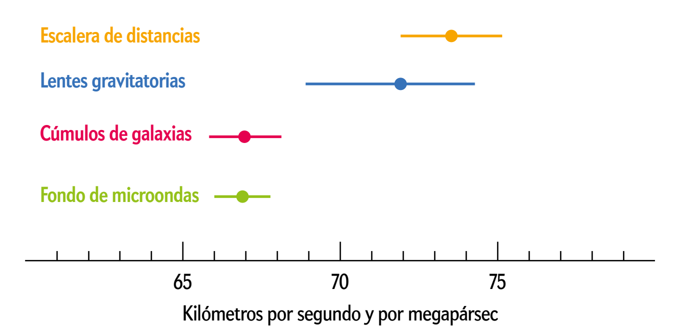
Es aquí donde aparece el dilema: para determinar el valor actual de la constante de Hubble por medio de la escalera de distancias, debemos observar galaxias en nuestro vecindario cósmico para las cuales el tiempo de viaje de la luz sea despreciable frente a la edad del universo. Sin embargo, en tales mediciones desempeña un papel clave la distribución de materia (las galaxias, los cúmulos de galaxias y los grandes vacíos), la cual ejerce una influencia directa sobre los movimientos peculiares de las galaxias. Tales movimientos no siempre se conocen, pero pueden enmascarar los efectos de la expansión cósmica.

Para que los movimientos peculiares de las galaxias no interfieran en la medición de la constante de Hubble, hemos de observar objetos situados a distancias de unos 300 millones de años luz o más, ya que es solo a partir de entonces cuando la velocidad de la expansión cósmica resulta claramente mayor que la asociada a los movimientos peculiares de las galaxias. Por tanto, una buena opción consiste en estudiar objetos situados a entre 300 y 500 millones de años luz, ya que para ellos la velocidad de expansión cósmica es lo suficientemente grande, pero el valor de la constante de Hubble sigue siendo similar al actual. Sin embargo, su distancia a la Tierra es ya tan enorme que no podemos determinarla con la precisión necesaria, lo que contribuye de manera determinante a la incertidumbre de los resultados.

Por todo ello, los investigadores tratan de desarrollar alternativas a los actuales peldaños de la escalera de distancias cósmicas. Una posibilidad al respecto la aportan los objetos denominados «megamáseres», que a menudo se encuentran a cientos de millones de años luz. Se piensa que son agujeros negros supermasivos alrededor de los cuales orbitan nubes moleculares. La radiación característica que emiten permite determinar, entre otras cosas, la separación entre las nubes y el agujero negro y, de manera indirecta, su distancia hasta nosotros. Por desgracia, hasta el momento solo se conocen unos pocos. Por otro lado, los datos finales de Gaia, los cuales deberían estar disponibles dentro de unos años, permitirán efectuar mejoras en la escalera de distancias cósmicas.

¿Y qué ocurre con las mediciones basadas en el fondo cósmico de microondas? ¿Es posible que se hayan visto afectadas por algún error? Algo así parece poco probable. Sin embargo, algo podría estar fallando en nuestro modelo cosmológico. O tal vez nuestra comprensión del universo temprano no sea completa.

Valores de la constante de Hubble



LA ESCALERA DE DISTANCIAS CÓSMICAS (*amarillo*) arroja un valor de la constante de Hubble que difiere del obtenido a partir del estudio de las estructuras a gran escala del universo (*rojo*) y del fondo cósmico de microondas (*verde*). El análisis basado en lentes gravitatorias (*azul*) proporciona un valor menos preciso que parece situarse entre los anteriores. Las líneas horizontales representan la incertidumbre de cada una de las medidas.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

POSIBLES SOLUCIONES

¿Constituyen estas discrepancias un primer indicio de nuevos fenómenos físicos? Al respecto, mis colegas de profesión ya han lanzado varias propuestas. Se ha argumentado que una nueva especie de neutrino, los llamados «neutrinos estériles», podrían explicar los datos [*véase* «El papel de los neutrinos en la evolución del universo», por Licia Verde; Investigación y Ciencia, abril de 2015]. También es posible concebir nuevas interacciones entre los tres tipos de neutrinos que conocemos, así como entre la materia oscura y la ordinaria. Estas y otras posibilidades habrían alterado de manera considerable la física del universo temprano, lo que llevaría a obtener otro valor de la constante de Hubble a partir de los datos del fondo cósmico. Hasta ahora, sin embargo, ninguna de las ideas con una buena base teórica encaja por completo con todas las observaciones.

Por otro lado, hemos también de contemplar la posibilidad de que ninguna de las mediciones sea incorrecta, ya que puede que ambos valores no tengan por qué coincidir. La medición local se basa en una fracción del universo conocido, mientras que la basada en el fondo cósmico representa una media asociada a todo el universo visible. A modo de analogía, no esperaríamos que la temperatura media diaria que anuncian cada mañana en el pronóstico del tiempo coincidiera con el valor medio de la temperatura anual. Por tanto, podría ocurrir que la tasa de expansión que medimos localmente presentase pequeñas variaciones de un lugar a otro del universo. Esto podría deberse, por ejemplo, a diferencias locales en la densidad de la materia. En los últimos años, varios grupos han llegado a la conclusión de que tales variaciones deberían afectar a las mediciones de la tasa de expansión cósmica, lo que podría reducir la discrepancia entre los valores de la constante de Hubble. Por ejemplo, en un trabajo efectuado en 2014 junto con otros colaboradores, demostramos que dichos efectos podían introducir una incertidumbre de hasta 2 km/s/Mpc en la medición local. Sin embargo, cabe esperar que



MEGAMÁSER: El agujero negro del centro de la galaxia Messier 106, situada a 25 millones de años luz, interacciona con las nubes moleculares circundantes, lo que provoca la emisión de intensas ondas de radio (*violeta*). Estos «megamáseres» proporcionan un método para determinar de manera independiente la constante de Hubble, si bien son poco frecuentes. La imagen muestra también la radiación X (*azul*) e infrarroja (*rojo*).

NASA/CXC/CALTECH/P. OGLE ET AL (*rayos X*); NASA/STSCI Y R. GENDLER (*visible*); NASA/JPL-CALTECH (*infrarrojo*); NSF/NRAO/VLA (*radio*)

dicho valor sea menor para los análisis más recientes de Riess y su equipo, ya que en ellos los investigadores analizaron un volumen local mayor.

En todo caso, se necesitarán más datos para resolver el misterio. Las ondas gravitacionales generadas en las colisiones de estrellas de neutrones, como la observada en 2017 por las colaboraciones LIGO y Virgo, ofrecen una posibilidad hasta ahora inexplorada para medir la tasa de expansión cósmica. Ello se debe a que en tales cataclismos se generan de manera simultánea grandes cantidades de ondas gravitacionales y de radiación electromagnética. La forma de las primeras permite medir de manera muy precisa la distancia a la fuente, mientras que el desplazamiento al rojo de las segundas hace posible calcular la velocidad a la que se aleja la galaxia en la que ocurrió la colisión. Juntos, estos datos proporcionan un punto en el diagrama de Hubble. Hasta ahora no hemos observado más que una fusión de estrellas de neutrones, y la precisión del método solo es del 10 por ciento. Con todo, constituye un resultado impresionarse para ser la primera medición con una técnica completamente nueva.

Quien espere un progreso rápido en esta dirección seguramente se sentirá decepcionado. Aunque cabe esperar que en un futuro próximo se detecten más colisiones de estrellas de neutrones, se tratará de eventos cercanos en términos cósmicos. Ello hará que, al igual que en las mediciones basadas en la escalera de distancias, los resultados puedan verse afectados por el movimiento peculiar de las galaxias, lo que presumiblemente limitará la precisión de esta técnica, al menos por el momento. [*Nota de los editores: En enero de este año, las colaboraciones LIGO, Virgo y Sondeo de la Energía Oscura presentaron una nueva técnica para estimar el valor de la constante de Hubble a partir de fusiones de agujeros negros, más comunes que las de estrellas de neutrones. Por otro lado, un estudio publicado en* Nature Astronomy *el pasado mes de febrero presentó una nueva técnica para ampliar la escalera de distancias cósmicas con medidas de cuásares distantes.*]

También cabe esperar avances en relación con los megamáseres, ya que nos permitirán saltarnos varios peldaños de la escalera de distancias. Y, en un futuro cercano, también entrarán en funcionamiento una serie de grandes proyectos científicos, como la red de radiotelescopios conocida como la Batería del Kilómetro Cuadrado (SKA), en Sudáfrica y Australia; el Telescopio Extremadamente Grande (ELT), en Chile; y el telescopio espacial Euclides, que investigará la energía oscura. De un modo u otro, el problema del valor de la constante de Hubble seguirá alimentando la creatividad de los científicos. Puede que la idea que resuelva este problema aún esté por nacer. IyC

PARA SABER MÁS

Value of H_0 in the inhomogeneous universe. Ido Ben-Dayan et al. en *Physical Review Letters*, vol. 112, art. 221301, junio de 2014.

A 2.4% determination of the local value of the Hubble constant. Adam G. Riess et al. en *The Astrophysical Journal*, vol. 826, art. 56, julio de 2016.

Planck 2015 results-XIII. Cosmological parameters. Colaboración Planck en *Astronomy & Astrophysics*, vol. 594, art. A13, septiembre de 2016.

H0LiCOW–V. New COSMOGRAIL time delays of HE 0435–1223: H_0 to 3.8 per cent precision from strong lensing in a flat ΛCDM model. Vivien Bonvin et al. en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 465, págs. 4914-4930, marzo de 2017.

Elucidating ΛCDM: Impact of baryon acoustic oscillation measurements on the Hubble constant discrepancy. Graeme E. Addison et al. en *The Astrophysical Journal*, vol. 853, art. 119, febrero de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Cuando la aceleración cambió de signo. Adam G. Riess y Michael S. Turner en *IyC*, abril de 2004.

La constante de Hubble y el universo en expansión. Wendy Freedman en *IyC*, junio de 2004.

La constante cosmológica. Lawrence M. Krauss y Michael S. Turner en *IyC*, noviembre de 2004.

El rompecabezas de la energía oscura. Adam G. Riess y Mario Livio en *IyC*, mayo de 2016.

José Manuel Sánchez Ron es miembro de la Real Academia Española y catedrático de historia de la ciencia en el Departamento de Física Teórica de la Universidad Autónoma de Madrid.



HISTORIA DE LA CIENCIA

Volta, Ørsted y Ampère

Un recorrido por los instrumentos y los experimentos que llevaron al nacimiento del electromagnetismo

José Manuel Sánchez Ron

La ciencia busca establecer leyes lo más generales posible a las que obedezcan los fenómenos que se dan en la naturaleza. Esta es la tarea a la que se dedican, básicamente, los científicos teóricos. Sin embargo, es imposible encontrar tales leyes sin mirar lo que sucede, esto es, sin realizar experimentos. La naturaleza es mucho más «imaginativa» que la más fecunda y creativa de las mentes humanas. Y si hablamos de experimentos, hay que hacerlo de instrumentos. Los hay y ha habido de todo tipo, desde las humildes reglas de medir hasta los gigantescos y complejos aceleradores de partículas o telescopios espaciales, pasando por otros menos abrumadores como termómetros, telescopios, microscopios, barómetros o ultracentrifugadoras. Todos ellos han abierto puertas al conocimiento de la naturaleza antes vedadas. De uno de ellos, cuya repercusión fue extraordinaria, me voy a ocupar aquí: la pila (o batería) eléctrica inventada en 1800 por el físico de la Universidad de Pavía Alessandro Volta (1745-1827).

Alessandro Volta

En realidad, lo que hizo Volta fue reaccionar ante los resultados obtenidos por el médico Luigi Galvani (1737-1798). En 1786, mientras estudiaba la influencia de la electricidad en la irritabilidad de los nervios de animales, Galvani observó que cuando los nervios lumbares de una rana muerta se comunicaban con los músculos crurales por medio de un circuito metálico, estos se contraían violentamente. Sabedor al menos desde 1780 de que las descargas producidas en máquinas eléctricas daban lugar a conmociones análogas sobre ranas muertas, Galvani atribuyó el fenómeno que observó en 1786 a la existencia de una electricidad inherente al animal, que, en su opinión, era «producida por la actividad del cerebro, y extraída muy probablemente de la sangre, y transmitida a los músculos a través de un fluido eléctrico», como manifestó en su libro *Viribus electricitatis in motu musculari* («Comentario sobre los efectos de la electricidad en el movimiento muscular», 1791).

La tesis de Galvani fue criticada por Volta, que advirtió que las contracciones musculares eran mucho más enérgicas cuando el vínculo entre las dos partes de la rana estaba formado por dos metales unidos. Dedujo, en consecuencia, que la electricidad se producía en el contacto entre ambos metales y que las partes animales no desempeñaban más papel que el de conductores, sirviendo al mismo tiempo como detectores de electricidad muy sensibles. En base a esta idea, construyó un «generador de electricidad», completamente diferente a la botella de Leiden. Se componía de una serie de discos apilados unos sobre otros en la estructura siguiente: un disco de cobre, otro de cinc, una rodaja de paño empapada en agua acidulada, luego un disco de cobre, otro de cinc, una nueva rodaja de paño, y así sucesivamente

CORTESÍA DEL AUTOR



VOLTA EXPERIMENTANDO con la pila y otros instrumentos científicos en su laboratorio, por Alessandro Rinaldi.

en el mismo orden, cuidando de sostener los discos mediante tres cilindros aislantes de vidrio. Se trataba de un instrumento revolucionario, ya que producía corriente eléctrica de manera continua, y no mediante descargas. Ello abría de par en par las puertas al estudio de los fenómenos eléctricos.

Para difundir su invención, Volta escogió el formato de una carta, pero una para hacerla pública, no limitada a un único corresponsal. La envió a Joseph Banks, presidente de la Real Sociedad inglesa, quien hizo que se publicase (en su original francés, aunque bajo el título en inglés «On the electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kinds») en las *Philosophical Transactions* de la Sociedad. Enseguida fue traducida al inglés para su publicación en el *Philosophical Magazine*. La carta comenzaba como sigue:

Después de un largo silencio, por el cual no ofrezco ninguna excusa, tengo el placer de comunicarle a usted, y a través suyo a la Real Sociedad, algunos resultados notables que he obtenido continuando con mis experimentos sobre la electricidad excitada por el mero contacto mutuo entre diferentes tipos de metales, e incluso por el de otros conductores, también diferentes entre sí, ya sean líquidos o contengan algún líquido, a los que se debe propiamente su poder conductor. El principal de estos resultados, que prácticamente comprende todo el resto, es la construcción de un aparato que se parece en sus efectos (esto es, en la conmoción que es capaz de producir en los brazos, y otras experiencias) a la botella de Leiden o, más bien, a una batería eléctrica cargada débilmente que actúa incesantemente, y que se cargase a sí misma después de cada explosión; en una palabra, que tuviese una carga inagotable, una acción o impulso perpetuo o impulso sobre el fluido eléctrico.

Hay desarrollos científicos que tardan en difundirse, en ser aceptados por la comunidad científica. El de Volta no fue uno de ellos. Y él ayudó a que así fuera.

En septiembre de 1801, Volta partió hacia París con el objetivo de dar a conocer su descubrimiento, que también había anunciado en una revista francesa. No era, en absoluto, un francófilo, sino un anglófilo, como demuestra el que enviase las primeras noticias de la pila a Inglaterra. De hecho, su comportamiento únicamente se puede entender en clave política. Cuando anunció al presidente de la Real Sociedad su hallazgo, Austria, aliada de los británicos, había recuperado momentáneamente el control de Lombardía, que los franceses habían tomado en la primavera de 1796. Los franceses cerraron entonces la Universidad de Pavía y Volta perdió su empleo y salario. Y cuando viajó a París, en el otoño de 1800, las tropas galas habían vuelto a controlar Italia. También, por supuesto, hay que tomar en cuenta que, entonces, a ojos de muchos era París, y no otras ciudades como Londres, el centro mundial de la ciencia.

En París se entrevistó con Chaptal, Berthollet, Monge, Fourcroy y Cuvier, siendo asimismo invitado a presentar sus resultados en el Instituto de Francia. Napoleón asistió a las tres demostraciones que realizó Volta en el Instituto y propuso que se le otorgase una medalla de oro. La propuesta del primer cónsul se aceptó. François Arago explicó años más tarde que «el profesor de Pavía se convirtió para Napoleón en el prototipo del genio. Así le hemos visto condecorado con la Cruz de la Legión de Honor y con la Corona de Hierro; nombrado miembro del Consejo Italiano; elevado a la dignidad de conde y a la de senador del reino lombardo. Cuando [una representación italiana] se presentaba en el palacio, si Volta, por casualidad, no se encontraba allí, surgían las bruscas preguntas, "¿Dónde está Volta? ¿Estará enfermo? ¿Por qué no ha venido?", que mostraban con demasiada claridad que a los ojos del soberano los otros miembros, a pesar de sus saberes, no eran más que simples satélites del inventor de la pila».

Hans Christian Ørsted

Uno de los científicos que tuvo pronta noticia del invento de Volta fue el danés Hans Christian Ørsted (1777-1851), que el 5 de septiembre de 1789 había defendido su tesis doctoral utilizando para ello, traducido al latín, un trabajo suyo titulado *Grundtraekkene af Naturmetaphysikken* («Fundamentos de la metafísica de la naturaleza»). Se trataba de una exposición de carácter filosófico en la que primaba la idea de que el atomismo no podía competir en la explicación de la naturaleza, incluida la materia, con una teoría que se basase en fuerzas. El deseo de crear una ciencia de la naturaleza general, de entender la naturaleza como un todo orgánico, guio todos los intereses de Ørsted a lo largo de su carrera.

Aunque en su tesis aludía en ocasiones a fenómenos y experimentos físicos, acaso el joven Hans Christian no habría ido mucho más allá de sus divagaciones filosóficas; esto es, no se habría adentrado en el territorio de la experimentación. Pero poco después de finalizar sus estudios universitarios, aproximadamente al tiempo que Volta construía su pila, Ørsted fue encargado de dirigir una próspera farmacia en Copenhague mientras su propietario, Johan Georg Ludvig Manthey (1769-1842), hacía un largo viaje por el extranjero. Manthely conocía a Ørsted porque había enseñado durante un tiempo química farmacéutica en la Academia de Cirugía y le había tenido como alumno. La oportunidad fue magnífica porque entre las amplias facilidades de la farmacia figuraba un laboratorio, en el que Ørsted pudo iniciarse en las prácticas galvánicas. Le ayudaron en este sentido los trabajos del físico y filósofo alemán Johann Wilhelm Ritter (1776-1810), cuyas investigaciones experimentales pretendían comprender los fenómenos eléctricos, galvánicos, magnéticos y químicos no aislados, sino a través de sus relaciones mutuas. Ørsted compró y leyó con pasión el libro de Ritter *Beweis, dass ein beständiger Galvanismus den Lebensprozess in Thierreich begleite* («Demostración de que un galvanismo continuo acompaña los procesos de la vida en el reino animal», 1798).

Una vez que Manthey regresó, fue Ørsted quien emprendió una gira europea. En agosto de 1801 partió en un viaje que le llevó a Alemania, Francia y Holanda. El 18 de septiembre se entrevistó con Ritter; en su diario anotó: «Este hombre ha hecho grandes hallazgos de los que solamente pocos son conocidos; una parte de sus descubrimientos han sido publicados por otros como si fueran suyos, y él es muy reservado. No ha sido sino después de varias entrevistas como he ganado su confianza». Y no hay duda de esa familiaridad: de las 631 páginas del segundo volumen de la correspondencia de Ørsted, 254 reproducen cartas que intercambiaron. Dado que Ritter es especialmente recordado por haber construido en 1802 una batería electroquímica formada por 50 discos de cobre separados por discos de cartón empapados con una solución salina (fabricó una gran pila de Volta que acumulaba electricidad), la inferencia de que Ørsted conoció la pila de Volta a través de los escritos de Ritter no es arriesgada. Asimismo, Ritter defendía la *Naturphilosophie*, el movimiento

filosófico romántico alemán, uno de cuyos elementos era la unidad de las fuerzas presentes en la naturaleza, tesis que Ørsted compartía y que facilitaría su descubrimiento de 1820.

Así fue como Ørsted se inició en unos estudios que harían de él, dos décadas más tarde, uno de los nombres que ninguna historia de la física puede dejar de citar. El 21 de abril de 1820, durante una clase (desde 1806 era profesor en la Universidad de Copenhague), Ørsted demostró que la variación de electricidad afecta al magnetismo. Abría así la puerta al estudio de la interacción entre ambas fuerzas, una senda en la que se distinguieron Michael Faraday (1791-1867) y James Clerk Maxwell (1831-1879), quien produjo una gran síntesis electromagnética. El experimento fue en realidad sencillo. Empleó solo un circuito, una pila de Volta y una brújula situada al lado del circuito. Cuando se cerraba el circuito con la pila, en el momento en que comenzaba a circular la electricidad, la aguja de la brújula se movía. La electricidad afectaba al magnetismo; por consiguiente, de alguna manera estas dos fuerzas estaban relacionadas.

Al igual que había hecho con su tesis, Ørsted escribió primero una memoria, muy breve, en latín, a la que siguió otra más extensa, *Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magneticam* («Experimentos sobre el efecto del conflicto eléctrico en una aguja magnética»), que envió a sociedades y científicos extranjeros. Fue traducida y publicada inmediatamente al inglés, alemán, italiano y francés, lengua en la que se publicó en el tomo 14 del *Journal de Physique, de Chimie, d'Histoire Naturelle et des Arts*, bajo el título de «Expériences sur l'effet du conflict électrique sur l'aiguille aimantée». La Academia de Ciencias parisina, en un acto no muy diferente al que veinte años antes había dedicado a Volta, lo honró con un premio. El 5 de abril de 1822, Jean-Baptiste Delambre, secretario permanente de la sección de Ciencias Matemáticas, le escribía al respecto:

Es con el mayor placer, Señor, que tengo el honor de anunciaros que queriendo recompensar vuestro descubrimiento de la acción de la pila voltaica sobre la aguja imanada, que proporciona un nuevo principio a las matemáticas aplicadas, y que ya ha dado lugar a aplicaciones interesantes, que la Academia os ha concedido el premio de matemáticas de este año, consistente en una medalla de oro de tres mil francos de valor.

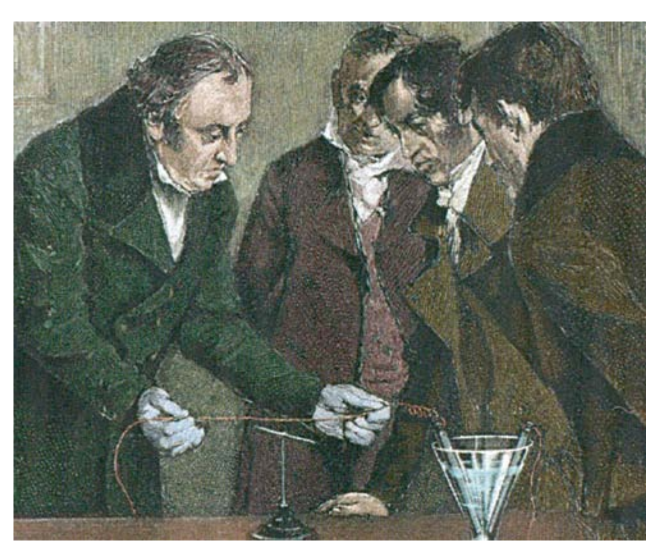
El premio será anunciado solemnemente en la sesión pública del 8 de este mes y podrá hacer retirar el valor en la secretaría del Instituto por la persona que juzgue conveniente, mediante la acreditación correspondiente.

Las presentaciones públicas de los trabajos científicos no son necesariamente fiables en lo relativo a cómo se llegó a ellos. Ni siquiera cuando se trata de un experimento aparentemente tan sencillo como el que llevó a cabo Ørsted en 1820. Por fortuna, disponemos de una carta que un antiguo colaborador de Ørsted, el noruego Christopher Hansteen (1784-1873), escribió a Faraday el 30 de diciembre de 1857, mucho tiempo después, cierto es, del descubrimiento. A pesar de una distancia temporal tan amplia, arroja luz sobre las circunstancias en que este se realizó:

El profesor Ørsted era un hombre de genio, pero un muy pobre experimentador; no podía manipular instrumentos. Tenía que tener siempre un ayudante o uno de sus oyentes, que fuesen hábiles con las manos para preparar el experimento; le ayudé a menudo de esta manera, como un oyente. Ya en el siglo anterior, muchos pensaban que existía una gran conformidad y tal vez identidad entre las fuerzas eléctrica y magnética; solamente era cuestión de demostrarlo experimentalmente. Ørsted había intentado colocar el cable de su batería galvánica perpendicular (en ángulo recto) sobre la aguja magnética, pero no advirtió ningún movimiento apreciable. En una ocasión, después del final de su clase, como había utilizado una batería galvánica potente para otros experimentos, dijo: «Como la batería está en uso, intentemos ahora colocar el cable paralelo a la aguja». Al hacer esto, se sorprendió al ver que la aguja oscilaba mucho (casi en ángulos rectos con el meridiano magnético). Entonces dijo: «Invirtamos el sentido de la corriente», y la aguja se desvió en la dirección contraria. Así se hizo la gran detección; y se ha dicho, no sin razón, que «se realizó accidentalmente». Antes, él [Ørsted] pensaba como cualquier otra persona que la fuerza debería ser transversal. Pero como en una ocasión parecida dijo Lagrange de Newton: «Estos accidentes solo se dan en personas que lo merecen».

Usted [Faraday] completó la detección, invirtiendo el experimento, demostrando que una corriente eléctrica puede ser excitada por un imán; y esto no fue un accidente, sino una consecuencia de un idea clara.

Efectivamente, en 1821, poco después de saber de los trabajos de Ørsted, Faraday demostró que un hilo por el que pasa una corriente eléctrica puede girar de manera continua alrededor de un imán (y viceversa). Con ello se vio que era posible obtener efectos mecánicos (movimiento) de una corriente que interacciona con un imán. Sin pretenderlo, había sentado el principio del motor eléctrico. Pero en su trabajo de 1821 aún no había demostrado el efecto recíproco al obtenido en 1820 por Ørsted; esto es, que la variación del magnetismo puede afectar a la electricidad. Esto lo conseguiría una década después, en 1831, prácticamente al mismo tiempo que el físico estadounidense Joseph Henry (1797-1878), aunque este se demoró en hacer públicos sus resultados.



ØRSTED mostrando que la electricidad afectaba al magnetismo.

André-Marie Ampère

Fue en Francia donde los científicos reaccionaron más rápidamente ante el experimento de Ørsted. El 3 de noviembre de 1820, desde París, el zoólogo Henri-Marie Ducrotay de Blainville, editor desde 1817 de la revista *Journal de Physique, de Chimie, d'Histoire Naturelle et des Arts* (donde se había publicado la traducción del artículo de Ørsted) y bien informado de lo que sucedía en la ciencia europea, anunciaba al científico danés que: «Sobre todo, M. Ampère, quien ya le profesaba una verdadera estima después de vuestra obra sobre la identidad de las fuerzas químicas y eléctricas, que le había proporcionado nuestro común amigo M. Chevreul, ha entrado con audacia en el campo que usted ha descifrado, y parece que su esfuerzo ha sido recompensado por descubrimientos importantes».

Básicamente, la dinámica de la recepción de la noticia del trabajo de Ørsted fue como sigue. Arago, que había estado viajando por el extranjero y sabido del descubrimiento de Ørsted mientras estaba en Ginebra, llevó en persona la noticia a París: el 11 de septiembre de 1820 describió el experimento en una de las sesiones de la Academia. El físico y matemático André-Marie Ampére (1775-1836), miembro de la Academia y profesor en la Escuela Politécnica, que estaba presente en la sesión, se dedicó enseguida a ahondar en las relaciones entre magnetismo y electricidad. Una de las ideas a las que llegó fue la posibilidad de que circuitos eléctricos ejercieran fuerzas entre sí. Pero esto no se podía deducir del experimento de Ørsted. Había que intentar demostrarlo experimentalmente, tarea a la que se dedicó enseguida. Una semana después del anuncio de Arago, consiguió demostrar que dos cables por los que pasa una corriente se atraen si las corrientes circulan en ambos circuitos en el mismo sentido, y se repelen si lo hacen en sentidos opuestos. Es la famosa ley de Ampére, una pieza importante de la electrodinámica. Publicó este resultado, junto a otros relacionados, en el decimoquinto volumen del *Journal de Physique, de Chimie, d'Histoire Naturelle et des Arts* bajo el título «Conclusions d'un mémoire sur l'action mutuelle de deux courans électriques, sur celle qui existe entre un courant électrique et un aimant, et celle de deux aimans l'une sur l'autre; lu à l'Académie Royale de Sciences, le 25 septembre 1820». Inmediatamente, otros dos físicos franceses, Jean-Baptiste Biot y Félix Savart, presentaron resultados también importantes derivados del experimento de Ørsted. De todo esto informaba también Blainville a Ørsted en la citada carta de noviembre. Pero, conforme a lo que pretende esta sección epistolar, terminaré citando una carta que Ampère escribió a su hijo, Jean-Jacques, que se encontraba en Ginebra, el 19 septiembre de 1820, en medio de los anteriores desarrollos, y que arroja luz sobre algunos detalles de lo que hizo Ampère y de las ayudas que recibió:

Nada me ha dado más placer, mi buen hijo, mi amigo más querido, que tus dos cartas desde Lucerna [del 9 de septiembre]. Me atormentaba no tener más noticias tuyas y, cuando las leí, era como un hombre famoso al que le llevan una excelente cena con dos servicios llenos de manjares deliciosos; estos manjares eran pensamientos, pinturas, sentimientos, que me atrapaban, me hacían participar de las impresiones que tú has sentido en esa bella Suiza y me encantaban por su parecido con las mías. Pintas admirablemente los lugares que has recorrido, y los detalles relativos al eclipse me han interesado particularmente. Espero tu regreso como un momento muy feliz de mi vida. Por lo que me dices, lo espero en tres semanas. ¡Continúa tomando nota de todas las plantas que encuentres en tu viaje! Si puedo conseguir algunas en el Jardín del Rey, las cultivaré en el mío y las verás allí en recuerdo de Suiza. [...]

25 de septiembre por la tarde. —He cometido un grave error y me arrepiento mucho de no haber enviado esta carta hace tres días. No encontraría consuelo si no pensase que enviándola mañana aún te encontrará en Ginebra, [...] pero todos mis momentos han estado ocupados con una circunstancia importante de mi vida. Desde que oí hablar por primera vez del bello descubrimiento del Sr. Ørsted, profesor en Copenhague, acerca de la acción de corrientes galvánicas sobre la aguja imanada, he pensado continuamente en ello y no he hecho más que escribir una gran teoría sobre estos fenómenos y todos los ya conocidos sobre el imán, e intentar experimentos adecuados para esta teoría, todos los cuales han tenido éxito haciéndome conocer otros tantos hechos nuevos. He leído el principio de una memoria en la sesión del lunes, hoy hace ya ocho días. Los días siguientes, he realizado, bien con Fresnel bien con Despretz, experimentos que la confirmaban; he repetido todos el viernes en casa de Poisson, donde se habían reunido los dos, De Mussy, Rendu, varios alumnos de la Escuela Normal, el general Campredon, etc. Todo funcionó de maravilla; pero el experimento decisivo que yo había concebido como prueba definitiva exigía dos pilas galvánicas; lo intenté en mi casa, junto a Fresnel, con dos pilas bastante débiles, pero no tuve ningún éxito. Por fin, ayer conseguí de Dulong que permitiera a Dumotier que me vendiera una gran pila que se había construido para el curso de física de la facultad y que acababan de terminar. Esta mañana el experimento se ha hecho en casa de Dumotier con éxito total y repetido hoy a las 4 en la sesión del Instituto [de Francia]. Ya no me han hecho ninguna objeción y aquí tengo una nueva teoría del imán que, de hecho, relaciona todos los fenómenos con los del galvanismo.

Esto no se parece en nada a lo que se decía hasta ahora. Se lo explicaré mañana de nuevo al Sr. Von Humboldt, y pasado mañana al Sr. Laplace en la Oficina de Longitudes.

Como vemos, en París existía una extensa comunidad de científicos. Era entonces la «capital de la ciencia», y electricidad y magnetismo se beneficiaron ampliamente de ello.

PARA SABER MÁS

On the electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kinds. Alessandro Volta en *Philosophical Magazine*, n.º 7, págs. 289-311, 1800.

Alexandre Volta. Oeuvres de François Arago, vol. I (Notices biographiques). François Arago. Gide y J. Baudry, París, 1854.

Correspondance de H. C. Ørsted avec divers savants, vol. II. Dirigido por M. C. Harding. H. Aschehoug & Co., Copenhague, 1920.

Correspondance du grand Ampère, vol. II. Dirigido por L. De Launay. Gauthier-Villars, París, 1936.

The correspondence of Michael Faraday, vol. 5 (1855-1860). Dirigido por Frank A. L. J. James. Institution of Engineering and Technology, Londres, 2008.

EN NUESTRO ARCHIVO

André-Marie Ampère. L. Pearce Williams en *IyC*, marzo de 1989.

por H. Joachim Schlichting

H. Joachim Schlichting es exdirector del Instituto de Didáctica de la Física de la Universidad de Münster.



Dunas musicales

Cuando las capas de arena de una duna se deslizan, los granos pueden oscilar de forma colectiva y producir sonidos sorprendentes. La causa última del fenómeno sigue intrigando a los físicos

La primera vez que visité una extensa playa que hay cerca de Burdeos, me sorprendió notar que, al caminar hacia la orilla, cada uno de mis pasos se veía acompañado de un chirrido relativamente agudo. No sabía que la arena seca pudiera producir sonido por el mero hecho de pisarla. Al fin y al cabo, parece difícil concebir un medio más simple que el que forman los granos de arena. Sin embargo, esos chirridos no son más que una pequeña muestra de un inmenso repertorio de sonidos posibles.

Desde tiempos inmemoriales los cronistas han relatado cómo, en muchos desiertos de arena y paisajes de dunas, los movimientos de la superficie, como los que tienen lugar en un alud, van acompañados de curiosos sonidos. En algunos casos, estos pueden ser ensordecedores y llegar a prolongarse durante varios minutos. Dependiendo de su frecuencia y volumen, quienes los han oído han hablado de cantos, silbidos, zumbidos,

H. JOACHIM SCHLICHTING

LAS LÍNEAS CLARAS Y OSCURAS en la cara de sotavento de una duna revelan que las capas de arena resbalan continuamente desde la cresta.

bramidos, gruñidos, aullidos o rugidos, y los han comparado, entre otras cosas, con el estrépito de un trueno o, en clave más moderna, con el ruido de un avión rasante.

Hoy tales afirmaciones pueden precisarse en términos de decibelios y de hercios: en la superficie de las dunas se miden intensidades acústicas de hasta 110 decibelios, mientras que las frecuencias varían entre 50 y casi 800 hercios. Ello hace que, en ocasiones, el sonido pueda escucharse a diez kilómetros de distancia.

Resulta comprensible que tales señales acústicas, aparentemente caídas del cielo del desierto, aterrorizasen en su día a los viajeros y suscitaran fantasiosas especulaciones sobre su origen. Ya en el siglo XIII, Marco Polo hablaba de los espíritus malignos del desierto del Gobi, que llenaban el aire «con sonidos de instrumentos musicales de todo tipo y, a veces, también con el ruido de tambores y armas». Más tarde, otros visitantes del desierto volverían a describir el fenómeno, como hiciera Charles Darwin en su *Viaje del Beagle*, de 1839.



Aunque pronto se comprendió que el mecanismo de acción fundamental eran los aludes, se ignoraban las condiciones concretas bajo las cuales llegaba a producirse el estruendo. De hecho, los físicos no comenzaron a estudiar el fenómeno con detalle hasta hace algunas décadas y, hoy por hoy, siguen persistiendo algunas incógnitas.

Mecánica granular

Existe un consenso sobre que los artífices de estos enérgicos cantos son los granos de arena, ya que los aludes pueden hacer que un gran número de ellos empiecen a oscilar de forma colectiva. No obstante, para ello deben concurrir varias circunstancias; entre ellas, que los granos estén muy secos y sean lo más esféricos posible, que exhiban una superficie lisa y libre de polvo o impurezas, o que presenten un tamaño bastante uniforme.

Los requisitos anteriores casi parecen condiciones de laboratorio. ¿Cómo se llega de manera natural a semejante situación? En ello el viento desempeña un papel esencial: transporta la arena y, casi sin cesar, forma y destruye las dunas al arrastrar granos del lado de barlovento y depositarlos en la cresta. Eso crea allí un exceso de arena que, de tanto en tanto, se precipita en forma de avalanchas por la ladera de sotavento.

Ese transporte suele comportar una clasificación de los granos, ya que, cuanto menores sean estos, más lejos llegarán. De hecho, si observamos con atención las ondulaciones de la arena que, a modo de arrugas, cubren muchas dunas, constataremos que los granos se disponen con frecuencia de manera muy ordenada en lo que respecta a su tipo y tamaño. Además, las partículas que comparten un destino común presentan también formas similares: en trayectos largos y con múltiples interacciones, los granos experimentan un proceso similar al que sufren las piedras en una máquina de tambor giratorio. Como consecuencia, todos ellos acaban con un grado muy similar de redondeo y pulido.

Cuando se desencadena un alud, una capa de arena se desliza por la ladera de sotavento y se produce una cizalladura: las diferentes capas se desplazan paralelas entre sí, pero de tal manera que las más profundas quedan rezagadas con respecto a las superficiales, ya que experimentan un rozamiento mayor. Al mismo tiempo, los granos de arena de la capa superior ruedan sobre los que se encuentran debajo, cayendo por momentos en los espacios que hay entre ellos para volver a remontar después. Ese proceso se repite a lo largo de todo el recorrido del alud, lo que induce un vaivén aproximadamente periódico de los granos de arena. Por lo general, estas oscilaciones pueden percibirse como un sonido relativamente débil.

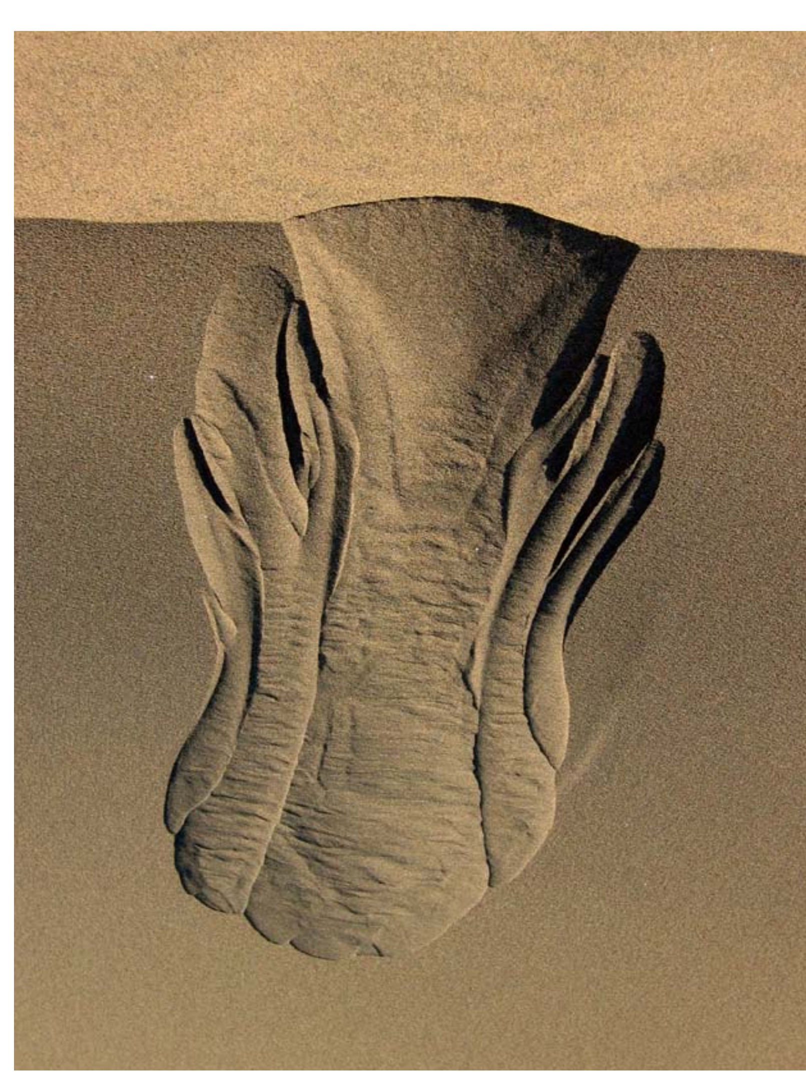
¿Altavoz o caja de resonancia?

Pero ¿cómo puede un proceso tan descoordinado traducirse en la vibración colectiva necesaria para generar un estruendo intenso y con una frecuencia fundamental clara? Por extraño que parezca, hoy por hoy esta pregunta sigue sin una respuesta concluyente.

El físico Bruno Andreotti, de la Universidad de París 7, ha argumentado que el deslizamiento de las avalanchas produce ondas elásticas en las capas de arena. Tales ondas sincronizarían las colisiones individuales de los granos en el seno del alud y transformarían las capas en una especie de membrana de altavoz: esta transmitiría las vibraciones al aire circundante y, de este modo, se convertirían en ondas sonoras.

Según indican las mediciones, la amplitud de la vibración elástica de la capa superior sería la misma para cualquier avalancha e incluso cualquier duna: un cuarto del diámetro de los granos de arena implicados. A partir del gradiente de velocidades (las diferencias entre la velocidad de la capa superior y las inferiores), los investigadores han conseguido calcular la frecuencia de las colisiones y han hallado que esta concuerda de manera aceptable con el tono de la avalancha correspondiente.

Por su parte, el grupo de Nathalie Vriend, de la Universidad de Cambridge, emplea un argumento distinto. Este se basa en la idea, expresada en repetidas ocasiones en la bibliografía científica, de que las dunas producirían sonido de modo similar a como lo hace un instrumento musical de cuerda o de viento. En uno de cuerda, por ejemplo, un arco u otro elemento hace que las cuerdas vibren. Sin embargo, el sonido que eso genera apenas resulta perceptible: son las vibraciones de la caja de resonancia del instrumento las que transforman casi por completo esa energía de vibración en sonido.

EN LA CARA DE SOTAVENTO DE UNA DUNA no dejan de producirse aludes de distinta magnitud (*izquierda*). En ocasiones, ello desencadena el desplazamiento de capas de arena individuales que acaban deslizándose unas sobre otras (*derecha*). Dicho fenómeno provoca que las capas vibren y, en ocasiones, generen sonidos muy intensos. Los físicos siguen sin ponerse de acuerdo en los detalles del proceso.

El estruendo de las dunas podría surgir de un modo muy parecido. Si las capas de arena individuales se conservan durante la avalancha y se desplazan como un todo unas sobre otras, pueden producirse oscilaciones colectivas de los granos. Eso debería convertir la propia duna en una potente caja de resonancia. En concreto, actuaría como una guía de ondas acústicas, de modo parecido como ocurre en el tubo de un estetoscopio. En los objetos de este tipo se forman ondas sonoras estacionarias con una frecuencia que queda determinada por el diámetro de la guía de ondas. En nuestro caso, el equivalente a ese diámetro sería el espacio que se extiende desde el aire adyacente en el exterior hasta la región más compacta y densa del interior de la duna.

Por lo general, esa distancia es de entre uno y dos metros, lo que permite calcular un valor típico de unos 80 hercios para la frecuencia fundamental. A pesar de las grandes simplificaciones que hemos hecho aquí, dicho resultado se ajusta bien al obtenido a partir del espectro acústico en estos casos, el cual arroja cifras de entre 70 y 100 hercios.

A la vista de lo anterior, mi asombro ante los chirridos que experimenté en la playa cercana a Burdeos no ha hecho más que aumentar. El análisis de este fenómeno debería resultar más sencillo que el de las dunas cantoras, si bien las diferencias entre ambos son notorias: el primero es mucho más agudo, con frecuencias de entre 500 y 2500 hercios, y también más corto, pues apenas se prolonga durante una fracción de segundo. Además, los granos de arena que retumban no chirrían, y viceversa. Sin duda, un buen problema para seguir especulando durante nuestras próximas vacaciones en la playa. IyC

PARA SABER MÁS

The song of dunes as a wave-particle mode locking. Bruno Andreotti en *Physical Review Letters*, vol. 93, art. 238001, diciembre de 2004.

Booming sand dunes. Melany L. Hunt y Nathalie M. Vriend en *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 38, págs. 281-301, mayo de 2010.

EN NUESTRO ARCHIVO

Los sonidos de la arena. Franco Nori, Paul Sholtz y Michael Bretz en *IyC*, diciembre de 1997.

Nuevos estados marginales. Vincenzo Vitelli y Martin van Hecke en *IyC*, mayo de 2012.

H. JOACHIM SCHLICHTING

por Bartolo Luque



Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid, donde investiga en teoría de sistemas complejos. Su labor docente y divulgativa fue reconocida por uno de los premios de la Real Sociedad Española de Física y la Fundación BBVA 2017.

La gramática del crecimiento multicelular

Los sistemas L, un tipo de lenguaje formal, permiten generar fractales y modelizar el crecimiento de las plantas con reglas sorprendentemente sencillas

¿Podemos formalizar matemáticamente el crecimiento de un organismo multicelular? En los años sesenta del siglo pasado, el biólogo teórico húngaro Aristid Lindenmayer se planteó esta pregunta y, para abordarla, se fijó en el caso más sencillo posible: el crecimiento de filamentos bacterianos, hileras de células como las que forman las cianobacterias del género *Anabaena*. En 1968, un año después de que Benoît Mandelbrot acuñara el término *fractal*, Lindenmayer publicó un artículo titulado «Modelos matemáticos de las interacciones celulares durante el desarrollo», donde proponía un modelo sencillo para describir el crecimiento de dichos filamentos multicelulares.

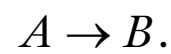


Las cianobacterias *Anabaena*, presentes en el plancton, forman filamentos multicelulares. La modelización matemática de su crecimiento inspiró al biólogo Aristid Lindenmayer el desarrollo de los sistemas L, un tipo de lenguaje formal con múltiples aplicaciones.

Lindenmayer redujo los complejos estados citológicos de las cianobacterias a tan solo dos posibilidades: *A* y *B*, relativas a su tamaño y capacidad de división. Así, un filamento bacteriano podía representarse como una cadena de símbolos del tipo *BABABBAB*... En su modelo, una célula en estado *A*, inmadura para la reproducción, cambiaba al siguiente paso de tiempo al estado *B*; una regla que puede escribirse como

$$A \to B.$$

Por su parte, una célula en estado *B*, de mayor tamaño y madura, se reproducía en la siguiente iteración y se transformaba en dos células: una nueva inmadura, en estado *A*, y la responsable de la división, en estado *B*. Esta nueva regla puede representarse de la forma



$$B \to AB.$$

En cada paso, cada letra *A* presente en la cadena se sustituye por una *B*, y cada *B* por el par *AB*. Así, partiendo de una condición inicial, o «axioma», y aplicando una y otra vez estas sencillas reglas, conseguiremos que nuestro filamento crezca. Por ejemplo, si comenzamos con una sola célula en el estado *A*, el resultado será

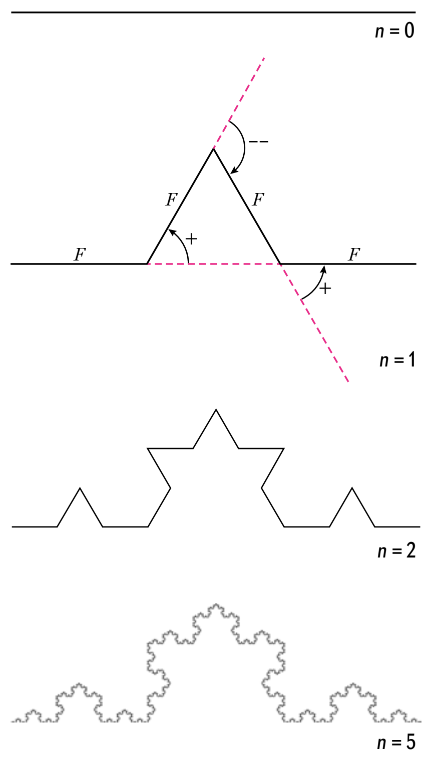
$$A \to B \to AB \to BAB \to ABBAB \to BABABBAB \to ABBABBABABBAB \ldots$$

Por cierto, si cuenta el número de células en cada iteración, obtendrá la ubicua sucesión 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21... ¿Le suena? Se trata de la sucesión de Fibonacci, donde cada término se calcula sumando los dos anteriores.

Gramática y fractales

El modelo que acabamos de describir proporciona un ejemplo de sistema L, o sistema de Lindenmayer: un tipo sencillo de gramática formal. En teoría de lenguajes formales, llamamos «gramática» a un conjunto de símbolos y unas reglas de producción. Estas describen cómo se forman nuevas cadenas de símbolos válidas de acuerdo con la sintaxis del lenguaje formal. En concreto, los sistemas L se enmarcan dentro de una categoría conocida como «sistemas de reescritura».

Hacia finales de los años cincuenta, la fascinación que provocaron las propuestas del lingüista Noam Chomsky pusieron de moda las gramáticas formales y, en particular, aquellos sistemas de reescritura que comenzaron a aplicarse para describir las características sintácticas de las lenguas naturales. La diferencia básica entre las gramáticas de Chomsky y los sistemas L reside en cómo se aplican las reglas de reescritura a una cadena dada. Mientras que en las gramáticas de Chomsky se aplican de manera secuencial, en



1. Transformación gráfica del axioma *F* (una recta horizontal, *n* = 0) a través de la regla de reescritura *F* → *F* + *F* – – *F* + *F*. Su primera aplicación da como resultado la siguiente curva poligonal (*n* = 1). En *n* = 2 vemos el resultado de aplicar la misma regla a todas las rectas de la curva anterior, y en *n* = 5 obtenemos ya una buena representación gráfica de la curva de Koch.

los sistemas L lo hacen en paralelo, todas a la vez.

Existen numerosos programas informáticos de libre distribución para implementar sistemas L (si están interesados, basta con que introduzcan el término en un buscador). Salvando detalles, nuestro ejemplo de crecimiento celular se escribe en todos ellos como

$$\text{Axioma } A;\ A \to B;\ B \to AB;$$

junto con el número de iteraciones que deseamos ejecutar. Y todos incorporan una sorpresa: traducen las cadenas de símbolos a estructuras geométricas que podemos visualizar en el ordenador. La complejidad gráfica que emerge a las pocas iteraciones explica la gran popularidad de los sistemas L, que pronto se convirtieron en un sencillo método para generar fractales.

¿Recuerdan el lenguaje de programación Logo? Fue diseñado en 1967 por el matemático Seymour Papert y sus colaboradores para enseñar a los niños rudimentos de programación. Los pequeños podían dirigir los movimientos de una tortuga usando comandos sencillos relativos a su posición y sentido de movimiento, como «avanza 25» y «gira a la derecha 90 grados». La tortuga dibujaba la trayectoria, lo que permitía obtener todo tipo de figuras geométricas.

Los sistemas L se inspiraron en los gráficos de tortuga para interpretar las cadenas de símbolos como una sucesión de comandos gráficos. Por ejemplo, la famosa curva fractal de Koch (*véase la figura 1*) se programaría así:

$$\delta = 60^{\circ};\ \text{Axioma } F;\ F \to F + F - - F + F.$$

El código establece que todos los giros serán de 60 grados en sentido antihorario con respecto al movimiento. Comenzando con una recta horizontal, F (el axioma), y avanzando de izquierda a derecha, la única regla de este sistema L nos dice que dicha recta se convertirá en cuatro: una horizontal; otra girada 60 grados en sentido positivo (+); otra rotada 120 grados en sentido negativo con respecto a la anterior (– –), y una última en la que volvemos a girar 60 grados (+).

En el paso $n = 1$ de la figura 1 vemos la traducción gráfica de la regla, donde las líneas discontinuas sirven de referencia y las continuas señalan el resultado de la primera iteración. A cada paso, el compilador reduce la escala y reajusta el tamaño de la figura. Vemos que, en tan solo cinco iteraciones, alcanzamos una aproximación más que respetable a la curva fractal de Koch.

Vuelta a la biología

Gracias a estas posibilidades gráficas, los biólogos interesados en la morfogénesis y el crecimiento de los seres vivos no tardaron en emplear los sistemas L para explorar la autosemejanza estadística que aparece en las ramificaciones de plantas y árboles. Sin embargo, con las reglas expuestas hasta el momento obtenemos curvas fractales sin ramificaciones. Para solventar esta carencia, se incorporaron al alfabeto dos nuevos símbolos: los corchetes de apertura ([) y de cierre (]).

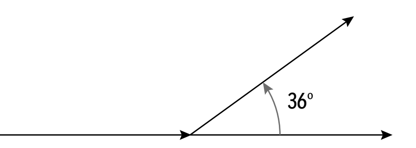
La figura 2 nos muestra cómo funcionan. Nuestro sistema L está ahora definido por

$$\delta = 36^{\circ};\ \text{Axioma } F;\ F \to F[+F]F.$$

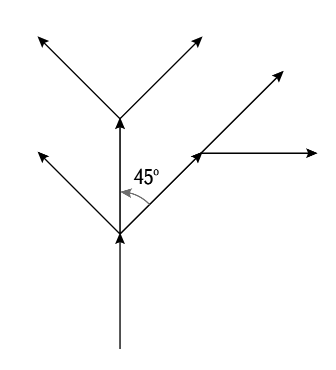
Esta regla nos dice que dibujemos una recta hasta el punto de ramificación. El corchete abierto indica que, al alcanzar ese punto, hay que almacenar en la memoria la posición y el ángulo. Después, cambiamos la dirección con un giro antihorario de 36 grados y dibujamos la rama. Luego el corchete cerrado nos devuelve al punto de bifurcación marcado por el corchete abierto, y finalmente acabamos de trazar la rama principal.

Para acabar de familiarizarse, intenten entender la arborescencia de la figura 3 partiendo de una recta vertical, un ángulo $\delta = 45^{\circ}$ y la regla

$$F \to F[+F][-F[-F]F]F[+F][-F].$$



2. Ejemplo sencillo de ramificación en un sistema L con un giro de δ = 36° y la regla de reescritura *F* → *F* [+*F*] *F*.



3. Estructura ramificada creada en la primera iteración del sistema L dado por δ = 45° y *F* → *F* [+*F*][–*F* [–*F*]*F*]*F* [+*F*][–*F*].



4. Primera y cuarta iteración del sistema L δ = 22,5°; *F* → *FF*+[+*F*–*F*–*F*]–[–*F*+*F*+*F*].

No parece que con la incorporación de estos símbolos vayamos a conseguir nada realista, ¿verdad? Pues sorpréndanse con la figura 4, que surge como resultado del sencillo sistema L

$$\delta = 22{,}5^\circ;\ \text{Axioma } F;$$
$$F \to FF+[+F-F-F]-[-F+F+F]\,.$$

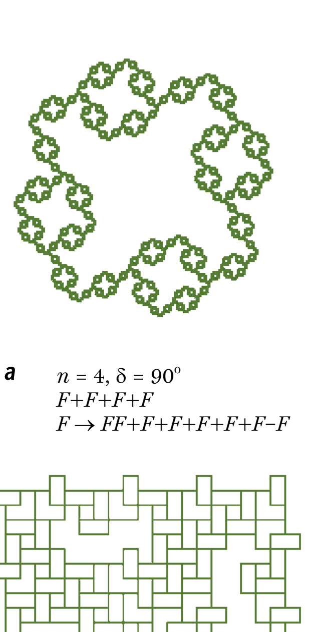
Partiendo de una línea vertical, la primera aplicación de la regla de reescritura nos da la pequeña rama mostrada para $n = 1$. Y con tan solo cuatro iteraciones, obtenemos un arbusto de un realismo extraordinario. Probablemente sea esta la lección más importante que nos ofrecen los sistemas L: podemos generar una gran complejidad a partir de la iteración de reglas sencillas, una idea con implicaciones para la relación entre genes y morfogénesis.

Genotipos y fenotipos

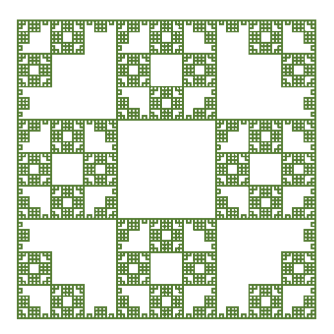
En los años noventa, en pleno auge de la vida artificial, los sistemas L se convirtieron en una versátil herramienta de exploración. Para entender las posibilidades que abrieron, observen las curvas de la figura 5. Todos los sistemas L que las generan tienen el mismo ángulo de giro, $\delta = 90^\circ$, y el mismo axioma, $F+F+F+F$ (un cuadrado). La llamativa variedad que observamos se origina al cambiar la regla de producción, en ocasiones en un solo símbolo, como ocurre entre las figuras *b* y *c*.

Si interpretamos el código de un sistema L como su genotipo y la gráfica como su fenotipo, la diferencia entre los fenotipos *b* y *c* puede entenderse como resultado de una mutación puntual. El psicólogo cognitivo Laurens Lapré, inspirado por la lectura de libro de Richard Dawkins *El relojero ciego*, creó Lparser, un compilador de sistemas L en tres dimensiones que permite hacer evolucionar nuestras criaturas a través de mutaciones en el código e introduciendo cierto azar, o ruido, en su representación gráfica. Los resultados son espectaculares, como podemos apreciar en su página web, desde donde podemos descargar el programa.

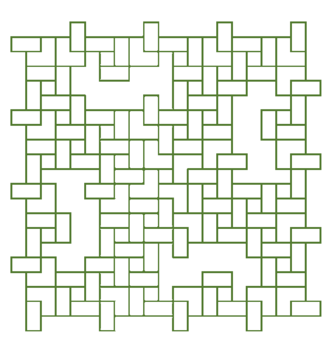
Aunque los sistemas L siguen empleándose para modelizar el crecimiento de los organismos, donde se han convertido en una herramienta de valor incalculable ha sido en la generación de imágenes por ordenador. Dado que, al fin y al cabo, todo es expresable en cadenas de símbolos, los sistemas L siguen siendo motivo de investigación en disciplinas como arquitectura, lingüística o robótica, y se emplean para comprimir datos o componer música. Y, tras medio siglo, siguen planteando algunas preguntas básicas que, hoy por hoy, siguen sin respuesta. Verbigracia: ¿cómo podemos, dada una estructura geométrica, encontrar el sistema L que la produce? ¿Se animan a intentarlo?

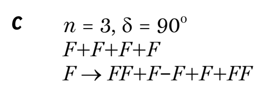


a $n = 4$, $\delta = 90^\circ$
$F+F+F+F$
$F \to FF+F+F+F+F+F-F$

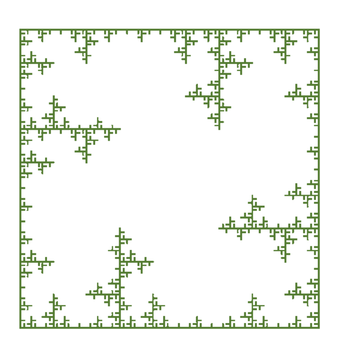


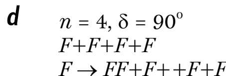
b $n = 4$, $\delta = 90^\circ$
$F+F+F+F$
$F \to FF+F+F+F+FF$



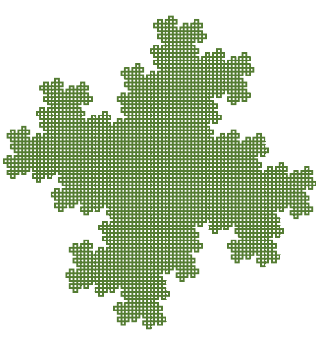


c $n = 3$, $\delta = 90^\circ$
$F+F+F+F$
$F \to FF+F-F+F+FF$

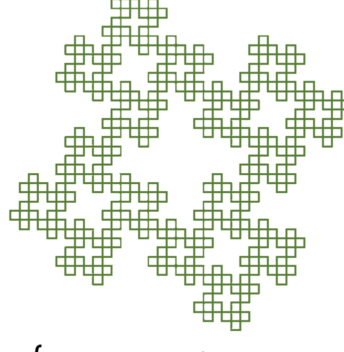




d $n = 4$, $\delta = 90^\circ$
$F+F+F+F$
$F \to FF+F++F+F$



e $n = 5$, $\delta = 90^\circ$
$F+F+F+F$
$F \to F+FF++F+F$



f $n = 4$, $\delta = 90^\circ$
$F+F+F+F$
$F \to F+F-F+F+F$

5. Seis variaciones geométricas obtenidas a partir de pequeñas modificaciones de la misma regla de reescritura.

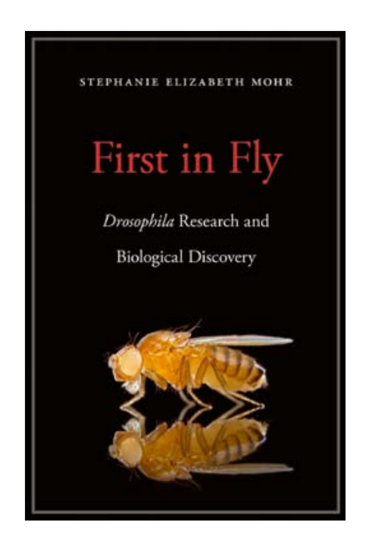
PARA SABER MÁS

Mathematical models for cellular interactions in development. Aristid Lindenmayer en *Journal of Theoretical Biology*, vol. 18, n.º 3, págs. 280-299 y 300-315, marzo de 1968.

Lindenmayer systems, fractals, and plants. Przemyslaw Prusinkiewicz y James Hanan. Springer Verlag, 1989.

The algorithmic beauty of plants. Przemyslaw Prusinkiewicz y Aristid Lindenmayer. Springer Verlag, 1990.

Página web de Lauren Lapré y su programa Lparser: **laurenslapre.nl**



FIRST IN FLY
DROSOPHILA RESEARCH AND BIOLOGICAL DISCOVERY
Stephanie Elizabeth Mohr
Harvard University Press, 2018

La ubicuidad de *Drosophila melanogaster*

La importancia de un insecto para entender la salud humana

La idea de que el conocimiento de las formas de vida más sencillas nos ha de llevar a desentrañar los organismos más complejos constituye la razón de ser de la experimentación animal. En el ámbito de la investigación genética se recurre a la levadura *Saccharomyces cerevisiae*, al nematodo *Caenorhabditis elegans*, al pez cebra *Danio rerio*, al ratón *Mus musculus* y a la planta crucífera *Arabidopsis thaliana*. Pero, por encima de todos, se recurre a la mosca *Drosophila melanogaster*. Escrito por la genetista de Harvard Stephanie Elizabeth Mohr, *First in fly* repasa las razones que, desde hace un siglo, han llevado a este diminuto insecto a convertirse en uno de los organismos mejor conocidos del planeta.

¿Cómo devino una mosca anodina en el organismo «modelo de modelos» de los laboratorios? Desde comienzos del siglo xx, cuando el pionero de la genética Thomas Hunt Morgan creó la «habitación de las moscas» en la Universidad de Columbia, la corta vida de este animal, su prolífico potencial reproductor, sus manifiestos fenotipos mutantes y sus semejanzas genéticas con los humanos lo convirtieron en la insignia del campo. Cuando Morgan cruzó un macho de ojos blancos con una hembra de ojos rojos, y después cruzó la progenie entre sí, advirtió un fenómeno sorprendente: el patrón de herencia del carácter blanco difería de machos a hembras. El gen que se alteraba en la cepa de moscas de ojos blancos se llamaría más tarde *white*. Morgan se rodeó de un plantel brillante de investigadores que, en las cuatro paredes de una estancia llena de viales con moscas en diferentes estadios de desarrollo, identificó moscas mutantes con defectos que afectaban a los ojos, las alas, las quetas o la cutícula. Con uno de esos colaboradores, Alfred H. Sturtevant, estudió el introductor de la genética en España, Antonio de Zulueta.

Por la fecha en que se informó del primer mutante *white*, en 1910, la comprensión de cómo pasaba la información de una generación a la siguiente constituía un reto intelectual. Gregor Mendel había publicado sus trabajos sobre la pauta de la herencia de determinados caracteres tomando como organismo modelo los guisantes del huerto de su monasterio. Mendel propuso que cada uno de nosotros porta una copia de cada carácter, una procedente del padre y otra de la madre. Estableció dos leyes principales: el principio de segregación de los caracteres y el de distribución independiente de los alelos. Sugirió, además, que los caracteres podían presentarse en una vertiente dominante y en otra recesiva.

Drosophila pertenece al orden de los dípteros, o insectos con dos alas y dos halterios, grupo que incluye a vectores como el de la malaria, el dengue, la encefalitis equina, el virus del Zika, la enfermedad del sueño o la filariasis. En estado adulto, la mosca presenta un cuerpo constituido por cabeza, tórax y abdomen. Posee un exoesqueleto que le confiere soporte estructural, pone huevos, los embriones eclosionan en forma de larvas y estas se convierten en pupas que entran en metamorfosis para emerger luego en estado adulto. Así pues, se diría que este insecto no tiene nada en común con el ser humano.

Sin embargo, el paralelismo entre moscas y humanos trasciende los mecanismos de la herencia y se extiende a la constitución de los genes, la estructura y función del ARN y las proteínas, el comportamiento a nivel molecular y de organismo, la formación de tejidos y órganos, el envejecimiento y el metabolismo. La mosca adulta tiene un cerebro complejo, un reloj interno, cinco sentidos (vista, oído, gusto, tacto y olfato) y numerosos tejidos semejantes a los nuestros. Presenta músculos, un par de riñones, un hígado, una red tubular que no difiere mucho de nuestros vasos, un sistema digestivo e incluso un corazón.

Su cerebro ha alcanzado la complejidad suficiente para controlar un amplio repertorio de comportamientos: buscan alimento, los machos danzan y cantan para seducir a la hembra, huyen de los depredadores, mantienen un ritmo circadiano diurno y, si se embriagan, se muestran más torpes en la elección de pareja. Al igual que ocurre en los mamíferos, las teneurinas intervienen en el cableado correcto del cerebro. En investigación básica se les somete a manipulación genética para simular trastornos del desarrollo e inducir pautas de enfermedades neurodegenerativas, cáncer o diabetes. Y, como nosotros, aprenden y recuerdan, luchan contra las infecciones y pierden reflejos a medida que envejecen. La investigación sobre las moscas aporta respuestas sobre un inmenso repertorio de cuestiones en biología y medicina.

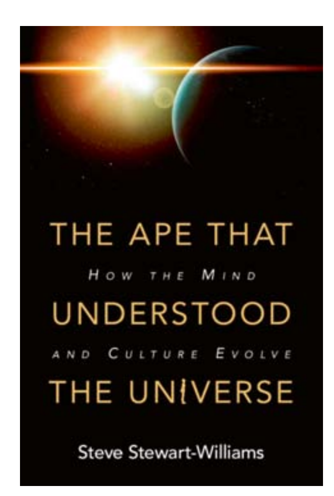
Si miramos un vial de moscas en diversas fases de crecimiento y con sus nutrientes típicos (harina de maíz, levadura, azúcar, agua y agar), percibiremos una secuencia cromática que va desde el *beige* del alimento hasta el blanco de huevos y larvas. A medida que estas van creciendo, empiezan a reptar por las paredes del vial y las pupas emergentes van adquiriendo una tonalidad ámbar. Cuando la mosca está a punto de salir, se adivinan dos puntos grises bajo la cubierta pupal translúcida: las alas. Constituida la mosca, destaca sobre ese fondo de color neutro el rojo intenso de los ojos, dos joyas con facetas a la manera de un domo geodésico.

Algunas mutaciones resultan auténticas representaciones de lo que en un tiempo se dio en llamar curiosidades de la naturaleza: aparición de las patas donde deberían surgir las antenas, o moscas con un segundo par de alas por halterios. Esta clase de fenotipo mutante, en el que una parte del cuerpo se sustituye por otra, se conocía ya en plantas, un fenómeno al que William Bateson denominó «homeosis». También hay moscas con una parte

corporal ausente: las mutantes vestigiales (carentes de ojos, por ejemplo).

Los científicos poseen ahora acceso al genoma de miles de personas. Se han realizado experimentos con cultivos de células humanas abastecidos por nutrientes líquidos. Es posible experimentar con células extraídas directamente de tejidos normales o enfermos, y puede manipularse la secuencia de genes con una precisión sin precedentes. A partir de células de la piel o de otros tejidos, es posible generar células madre pluripotentes inducidas, y ya podemos modificar la secuencia de ADN de las células humanas, usando por ejemplo la técnica CRISPR. Pero ni solos ni en conjunto han suplantado estos avances la importancia de *Drosophila* en la investigación biológica y biomédica. *Drosophila melanogaster* constituye el organismo multicelular mejor conocido del planeta. Contamos con el repertorio entero de sus genes y con su disposición en los cromosomas, conocemos la función de los genes y su control del desarrollo. Es decir, su comportamiento.

—*Luis Alonso*



THE APE THAT UNDERSTOOD THE UNIVERSE
HOW THE MIND AND CULTURE EVOLVE

Steve Stewart-Williams
Cambridge University Press, 2018

Nuestra especie vista desde fuera

Una defensa de nuestra herencia biológica es necesaria, aunque potencialmente peligrosa para ojos radicales

Darwin siempre está de moda. Lo está por omisión, como en algunas escuelas de EE.UU., donde se enseña el arca de Noé como hecho objetivo de la historia de la humanidad, y también por acción, como podemos ver en libros y documentales sobre la evolución de nuestra especie. Saber qué nos hace humanos no es solo una pregunta filosófica que nos une a pensadores desde la antigua Grecia. Es también una que requiere una base científica; es decir, conocer lo que sabemos objetivamente sobre nuestra especie.

Para responderla hay numerosos títulos de obligada consulta. Si bien habría que empezar por la fuente original, *El origen de las especies* o *El origen del hombre* (con respectivos títulos mucho más largos en sus originales en inglés, por cierto), no podríamos dejar fuera otros que aborden la cuestión desde los distintos puntos de vista actuales. En este sentido, el debate principal que surgió tras la aceptación global de la evolución de las especies y el descubrimiento del genoma era el que preguntaba si somos producto de la biología (*nature*) o de nuestra interacción con el entorno (*nurture*).

Quienes defienden la primera postura creen que los genes y siglos de evolución biológica han ejercido un gran impacto sobre nosotros. Quienes preconizan la segunda consideran que son los sistemas sociales y culturales los que explican realmente cómo somos. Si bien la respuesta correcta suele ser un *aurea mediocritas*, no está de más interesarse por ambas perspectivas para tener argumentos a la hora de posicionarse. Así, junto a los libros de Darwin, no nos podrían faltar otros como *El gen egoísta*, de Richard Dawkins; *Sociobiología*, de Edward O. Wilson, o *La evolución de la cultura*, de Luca Cavalli-Sforza. La pregunta es si podríamos incluir en nuestra estantería el libro que nos ocupa.

Para definir la obra podemos empezar por el final, donde dos anexos dejan muy clara la intención del autor: convencernos de que la perspectiva evolucionista es la ganadora en la carrera por entender qué nos hace humanos. En ambos apéndices, Stewart-Williams se defiende de los argumentos contrarios a la biología evolucionista y a la negación de la selección natural en la cultura. Este formato es interesante, ya que los libros arraigados en una idea no suelen dar crédito a la contraria. Y quizá sea también un ejercicio necesario en un tiempo intelectual convulso, donde la política se inmiscuye en la ciencia y niega la existencia de algunos conceptos más que probados (como ocurre con el cambio climático).

No obstante, en ciertos sectores ideológicos con «hemiplejía moral», como diría Ortega y Gasset, esta defensa a ultranza de la psicología y la biología evolutivas correría el riesgo de ser malinterpretada y empleada para justificar lo injustificable —no sería la primera vez: ya en el siglo XIX se malinterpretó la supervivencia del más apto de Darwin en términos sociales—. Y aunque esto no sería culpa del autor, en este caso su insistencia acaba resultando tediosa para el lector medio y peligrosa para el lector radical.

El libro no debería leerse con demasiadas pausas temporales, ya que muchas de las preguntas que el autor se hace no quedan respondidas de forma inmediata. Ello revela ciertos problemas de estructura, donde el lector no puede intuir qué vendrá a continuación. Un punto positivo es que Stewart-Williams no es un académico corriente. Antes de ser profesor de psicología en la Universidad de Nottingham fue *rockero* (su álbum *Casual angst* puede oírse en SoundCloud) y su cuenta de Twitter se encuentra llena de curiosidades referentes a la evolución, la política y la psicología básica. Esta biografía inusual se nota en la obra, que exhibe un tono irónico, irreverente y plagado de anécdotas. Su estilo es más cercano a una *Ted Talk* que a un manual al uso. Eso permite una lectura fácil, que ahorra tecnicismos o que los explica de forma amable, aunque también le confiere una incorrección política flagrante, más propia del lenguaje oral.

La obra se divide en seis capítulos, de los que el primero sirve como base al resto. En él se emplea la supuesta visita de un antropólogo extraterrestre para despojarnos de nuestro *Umwelt*, de nuestra propia manera de ver el mundo, y convertirnos así en un observador ajeno a nosotros mismos. Dicho ejercicio es interesante, pues nos hace ver nuestra especie como el resultado de ciertos ambientes

y necesidades biológicas (entre las que se encuentra, principalmente, expandir nuestros genes).

A partir de aquí, cada capítulo habla por sí mismo. El segundo refresca los postulados de Darwin con una mecánica basada en proponer hipótesis cada vez más sutiles. No obstante, cuando se nos da a conocer un concepto tan interesante como el de «evolución desajustada» (*mismatch evolution*, la idea de que vivimos anacrónicamente porque nuestro cuerpo actual se corresponde con el de nuestros antepasados pero en un ambiente totalmente distinto), al lector le pueden asaltar dudas. Para despejarlas, sería interesante acudir a *El mono obeso*, de José Enrique Campillo, donde se analizan fenómenos modernos, como la aparición de la diabetes.

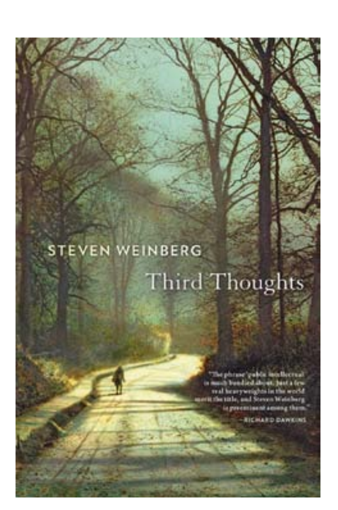
La obra aborda también las diferencias entre sexos. Al respecto, el autor defiende como causa principal la herencia biológica. Eso da lugar a ciertas frases que, sacadas de contexto, podrían herir algunas sensibilidades, como que «los hombres son más proclives a la infidelidad» (pág. 65) o que «las preferencias de los hombres han ayudado a moldear el pecho de las mujeres» (pág. 77). No obstante, lejos de abanderar el determinismo biológico, el autor insiste en que la construcción de una sociedad mejor pasa por asumir sin miedos esas diferencias biológicas, explicadas por siglos de funcionamiento en la especie, y aplicar las medidas sociales oportunas. Aquí, recurrir a lecturas desde los preceptos feministas, como *La creación del patriarcado*, de Gerda Lerner, ayudaría a conocer el curso histórico de estas medidas.

Stewart-Williams reserva otro capítulo al altruismo, la capacidad de hacer el bien a otros a un coste personal, y analiza cómo la evolución pudo haber seleccionado un rasgo tan paradójico. La propuesta es no observar a la persona altruista en el momento en que lo es, sino considerar qué beneficios ha obtenido su especie al permitir que prosperaran otros seres altruistas. El libro *¿Por qué cooperamos?*, de Michael Tomasello, profundiza en la cuestión a través del análisis de otras especies.

El viaje para entender mejor nuestra especie culmina en el mundo de la cultura. Aquí se nos dan a conocer los memes, que se refieren a las unidades de cultura que se propagan y evolucionan tal y como lo harían los rasgos físicos o psicológicos (por ejemplo, los virus o programas maliciosos en Internet). Una bonita lectura complementaria al respecto, también de Tomasello, sería *Los orígenes culturales de la cognición humana*.

El libro de Stewart-Williams es una buena opción para quien desee entender bien los principios evolutivos con una propuesta sugerente: atrevernos a vernos por dentro desde fuera. No obstante, el texto es repetitivo y con una postura teórica muy marcada. Quien desee profundizar en cada uno de los temas o en otras posturas deberá recurrir a lecturas complementarias.

—Nereida Bueno Guerra



THIRD THOUGHTS
Steven Weinberg
Harvard University Press, 2018

Steven Weinberg: de lo cósmico a lo humano

Reflexiones sobre ciencia, historia y cultura de uno de los físicos y comunicadores más brillantes de las últimas décadas

Steven Weinberg es, además de uno de los grandes físicos teóricos de la segunda mitad del siglo xx, una de las referencias intelectuales de la cultura estadounidense contemporánea. En las últimas tres décadas han sido frecuentes sus intervenciones públicas acerca de cuestiones científicas, culturales, sociales y políticas. Y, entendiendo la ciencia como una parcela más de la cultura, Weinberg ha sentido siempre la responsabilidad de hacerla accesible a un público amplio, dando además a sus lectores el crédito intelectual que merecen. El resultado han sido obras como *Los tres primeros minutos del universo*, un clásico de la divulgación científica que, cuarenta años después, sigue siendo una de las cumbres indiscutibles de este género.

En la estela de dos de sus títulos anteriores, *Facing up* (2001) y *Lake views* (2009), Weinberg nos ofrece en *Third thoughts* una recopilación de artículos y conferencias. Aunque la mayoría han aparecido publicados en varios medios (uno de ellos, «El problema de la mecánica cuántica», se publicó en esta revista en agosto de 2017), el libro incluye algunas contribuciones inéditas. Los temas tratados son amplios: la física de partículas y su futuro, la posibilidad del multiverso, el desconcertante mundo cuántico o el papel que desempeña la idea de simetría en la física teórica actual. Asimismo encontramos enriquecedoras discusiones sobre las similitudes entre la investigación científica y la creación artística.

En otros artículos más personales, el autor habla de su decepción tras el primer mandato de Barack Obama —que, desde su perspectiva liberal, fue una oportunidad perdida— y de su abstención en las elecciones presidenciales de 2012; de su opinión sobre el papel del mecenazgo privado en la vida cultural estadounidense o de sus vivencias como neoyorkino instalado en Texas.

Una cuestión presente en el libro es el papel de las grandes instalaciones como motor del progreso en física de partículas y cosmología. El compromiso del autor con la «gran ciencia» se remonta a su apoyo al Supercolisionador Superconductor (SSC), el gigantesco acelerador proyectado en Texas y que debería haber alcanzado energías casi tres veces superiores a las del Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN. En su momento, Weinberg defendió con vehemencia el proyecto ante el Congreso de EE.UU., a pesar de lo cual fue cancelado definitivamente en octubre de 1993.

El autor nos advierte de que las dificultades presupuestarias a las que se enfrenta la gran ciencia —y que previsiblemente aumentarán en el futuro— no solo son consecuencia de una insuficiente percepción pública de la importancia de la investigación. La puesta en marcha de grandes experimentos depende también de una correcta cultura fiscal que permita el gasto público en áreas vitales: sanidad, educación y ciencia. Es interesante que su defensa de la gran ciencia no impide a Weinberg criticar las misiones espaciales tripuladas, las cuales considera —no sin motivo— un dispendio sin beneficios científicos apreciables.

La historia de la ciencia es otra de las cuestiones centrales de *Third thoughts*. En particular, la polémica surgida tras la aparición de su libro *Explicar el mundo* (Taurus, 2015), en el que relataba el desarrollo de la física desde la Grecia clásica hasta Isaac Newton. Entonces Weinberg fue criticado por defender una interpretación anacrónica, más conocida como *whig*, de la historia de la física. En esta, los desarrollos son valorados en función de su relevancia para la ciencia actual, y no desde la perspectiva de las ideas sobre la naturaleza dominantes en cada momento histórico.

Ese punto de vista no solamente inspira *Explicar el mundo*, sino que ya había sido defendido por el autor en artículos recopilados en *Facing up*. Según Weinberg, al ser la ciencia —y la física en particular— progresiva y acumulativa, su historia tiene que estudiarse necesariamente desde la perspectiva de cómo las ideas y las teorías de cada período han contribuido a acercar la disciplina a su estado presente. Por eso, califica en *Third thoughts* de «absurdo» juzgar una teoría científica solamente por su éxito para dar respuesta a los problemas de la época en que fue formulada.

El indiscutible carácter progresivo de la ciencia parece apoyar esa interpretación anacrónica de su historia, algo difícil de mantener en la historia de las ideas en general. Sin embargo, no podemos olvidar que el historiador de la ciencia aspira a entender esta en un entorno cultural y en un período histórico concretos. Y, para ello, resulta ineludible valorar en qué medida una teoría resuelve o simplemente aborda los problemas considerados relevantes en el momento y en el lugar en el que fue formulada, evitando introducir motivaciones que no podían estar en la cabeza de sus autores.

En realidad, ambos puntos de vista sirven a propósitos muy distintos. Por eso, más interesante que ahondar en el debate es intentar entender las razones por las que Weinberg se adhiere a dicha postura. Lo primero que hemos de tener en cuenta es que él no es ni se considera un historiador de la ciencia. Como explicó hace años, aunque «trabaja en el país de la física», le encanta «visitar el de la historia como turista». Pero estos «viajes» no están motivados por un interés intrínseco en la historia de la física, sino que tienen un carácter claramente instrumental. Por una parte, en su faceta de comunicador de la ciencia, la historia se le presenta a Weinberg como un método muy eficiente para introducir la física a audiencias sin formación científica. Por otra, como investigador en física de partículas, se halla convencido de que conocer la evolución de la física a lo largo de los siglos ayuda a los científicos a entender el trabajo que llevan a cabo hoy, situándolo dentro de un contexto histórico.

Que la historia de la física proporciona una manera muy sugerente de introducir conceptos e ideas es algo que sabemos bien quienes nos enfrentamos a la docencia o la divulgación de esta ciencia. Pero es precisamente el uso propedéutico que hacemos de la historia el que nos obliga a asumir una perspectiva anacrónica. Al fin y al cabo, si el objetivo consiste en iluminar nuestro conocimiento actual, tiene completo sentido mostrar el pasado desde el punto de vista del presente.

Esta actitud puede ser apropiada para el docente y el divulgador, pero no para el historiador de la física. Por ello, la polémica que Weinberg analiza en *Third thoughts* es en cierta medida espuria y resulta de una doble pretensión: por una parte, que investigadores y comunicadores de la física se conviertan en historiadores y asuman metodologías que no están ajustadas a sus objetivos; por otra, que el historiador de la ciencia deje de hacer historia y se limite a confeccionar metanarrativas.

Como todos los libros de Steven Weinberg, *Third thoughts* está escrito en una prosa clara y elegante. El lector no solo disfrutará de amenas e interesantes discusiones sobre ciencia, historia y cultura, sino que se verá arrastrado a pensar con el autor sobre estos temas. Es por ello una lectura altamente recomendable.

—*Miguel Á. Vázquez-Mozo*
Departamento de Física Fundamental
Universidad de Salamanca

NOVEDADES

Una selección de los editores de *Investigación y Ciencia*



POR QUÉ EL ESPACIO HUELE A BARBACOA
Y OTRAS PREGUNTAS QUE SOLO UN ASTRONAUTA PUEDE RESPONDER
Tim Peake
Planeta, 2018
ISBN: 978-84-08-19625-9
312 págs. (17,50 €)



BREVES RESPUESTAS A LAS GRANDES PREGUNTAS
Stephen Hawking
Crítica, 2018
ISBN: 978-84-9199-043-7
288 págs. (17,90 €)

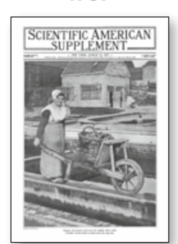


LA MATEMÁTICA DE LOS DIOSES Y LOS ALGORITMOS DE LOS HOMBRES
Paolo Zellini
Ediciones Siruela, 2019
ISBN: 978-84-17454-45-6
196 págs. (19,95 €)

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

MARZO


1969


1919


1869

1969

Contaminación térmica

«Parece que en EE.UU. el uso de las aguas de ríos, lagos y estuarios para la refrigeración industrial puede extenderse tanto en las décadas futuras que puede suponer una amenaza importante para los peces y la vida acuática en general. La descarga de calor residual en las aguas naturales está empezando a conocerse como contaminación térmica. Lo que les alarma a los ecologistas es que, con la creciente construcción de grandes centrales eléctricas nucleares, en los años venideros se prevé que la producción de energía eléctrica se multiplicará por nueve. En Gran Bretaña, donde las corrientes son pequeñas, el agua escasea y la vida acuática goza de gran aprecio, el recurso artificial elegido para deshacerse del calor residual ha sido el uso de torres de enfriamiento.»

«A un cuásar»

«Brilla, brilla, pequeño cuásar,
aspirante a la navaja de Occam:
¿estás cerca o estás lejos?
¿Eres una nebulosa o una estrella,
emitiendo toda esa energía
como una galaxia cualquiera?
Tu mensaje desde lo oscuro,
¿lo envían positrones o quarks?
Las líneas de tu espectro,
aunque bastante tenues,
solo nos dicen lo que no eres.
¿Qué raro fenómeno participa
en este enigma, aún no resuelto?
Stanley A. Bell, Laguna Hills
(California)»

El autor se inspiró en el poema de John Updike, publicado en el número de enero de 1969 de Scientific American, *y en el artículo sobre objetos cuasiestelares de Geoffrey Burbidge y Fred Hoyle, del número de diciembre de 1966.*

1919

Sobre el horario de verano

«Cuando se nos informó de que una disposición adicional al proyecto de ley de asignaciones agrícolas pretendía eliminar la ley sobre el horario de verano sufrimos una aguda conmoción. Cuando nos enteramos de que tal oposición se debía sobre todo a los agricultores, nuestro asombro se acentuó. Por supuesto que se levantan temprano, pero el trabajo de primera hora empieza con las rutinas caseras. Gran parte de las tareas en el campo no puede hacerse hasta que el rocío se haya disipado. El año pasado los agricultores tuvieron dificultades con los asalariados que insistían en acabar la jornada de acuerdo con el nuevo horario de verano. Y aunque parezca raro, las vacas se negaban tercamente a volver a los establos cuando el sol se hallaba en lo más alto. No obstante, hubo un auténtico ahorro en las facturas de la luz que no podemos permitirnos ignorar.»

Cámara de cine Akeley

«Mientras realizaba un minucioso trabajo científico en la jungla africana, Carl E. Akeley, del Museo de Historia Natural de Nueva York, encontró que, para las variadas situaciones del trabajo de campo, la cámara de cine corriente resultaba inadecuada y poco fiable. Concibió así los principios de la cámara que lleva su nombre. Brevemente, la cámara Akeley es un aparato individual, en el sentido de que el usuario puede, él solo, transportar la cámara, los rollos y el trípode y montarlos sin ayuda. Está provista de dos lentes gemelas, una para la película y la otra para el enfoque. Esa disposición permite observar la imagen en el visor, arriba a la derecha, mientras se acciona la cámara. Así, el operador puede saber siempre si la imagen está enfocada, ya que ve exactamente lo que la película está captando en cada instante. No cabe la menor duda de que la cámara Akeley es un aparato muy adecuado para filmar objetos en movimiento rápido, como lanchas motoras, aeroplanos, atletas, etcétera.»


1919: La nueva cámara de gran velocidad Akeley, en acción.

1869

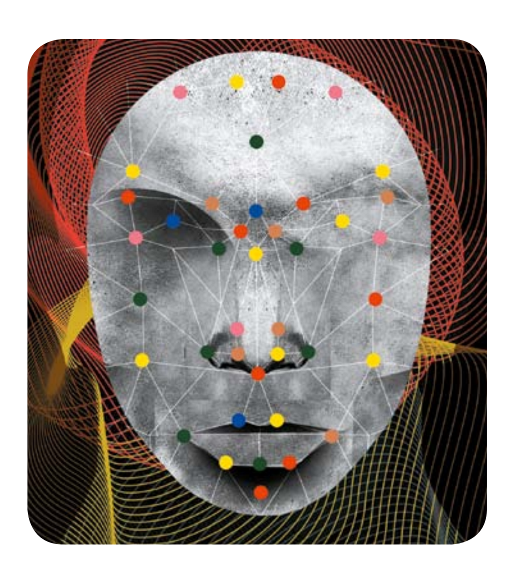
El canal de Panamá

«El honorable Caleb Cushing ha regresado de la capital de Colombia, la más septentrional de las repúblicas sudamericanas, adonde fue enviado por el Departamento de Estado. El borrador del tratado que allí negoció sobre el derecho de paso de una vía de navegación a través del istmo de Darien, o Panamá, se halla ahora en el Senado para su ratificación. El proyecto de comunicar los dos océanos mediante una incisión que atraviese la unión que enlaza los dos grandes continentes no es nuevo.

En 1843, el Gobierno francés envió a los señores Napoléon Garella y J. de Courtines para estudiar las posibilidades. Su informe se mostraba favorable a construir un paso por debajo de la cadena divisoria de Ahoga Yegua en forma de túnel de 5,3 kilómetros de longitud. Probablemente la mayoría de nuestros lectores conozca la desastrosa expedición del teniente Strain [de la Armada de EE.UU., 1843]. Un túnel de ferrocarril de apenas 6 metros de ancho es posible, pero uno que admita barcos es una proeza que podría espantar incluso a la ingeniería más moderna. Ahora, empero, se propone un canal, y sin túneles.»

El canal de Panamá no se inauguró hasta 1914.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CXX, N.º 13, 29 DE MARZO DE 1919



NEUROCIENCIA

Valor facial

Doris Y. Tsao

El estudio de las regiones cerebrales que procesan las caras arroja luz sobre los mecanismos neuronales de la visión.



BIOLOGÍA VEGETAL

Cuando las plantas hacen matemáticas

Teva Vernoux, Christophe Godin y Fabrice Besnard

Las plantas generan geometrías de gran complejidad. Comenzamos a entender los mecanismos biológicos que producen tan fascinantes patrones.

SALUD

«Los telómeros no son bolas de cristal»

Michaela Maya-Mrschtik y Frank Schubert

Entrevista con Elizabeth Blackburn, premio nóbel de medicina en 2009.

ASTRONOMÍA

El exoplaneta vecino

M. Darby Dyar, Suzanne E. Smrekar y Stephen R. Kane

Lo que Venus puede enseñarnos sobre los planetas situados más allá de nuestro sistema solar.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
DIRECTORA GENERAL Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Bruna Espar Gasset
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Eva Rodríguez Veiga
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN
EDITOR IN CHIEF AND SENIOR VICE PRESIDENT Mariette DiChristina
PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek



DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Prensa Científica, S. A.
Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO
Asesoramiento y traducción:
Juan Pedro Campos: *Apuntes*; Andrés Martínez: *Apuntes*; Javier Grande: *Apuntes, El problema de la constante de Hubble y Dunas musicales*; Lorenzo Gallego: *Cuando la primera línea de defensa fracasa*; Fabio Teixidó: *Transformar el sistema alimentario global, Capturemos el carbono y El último recurso*; Pedro Pacheco González: *Actividad física: una necesidad fisiológica*; Luis Cardona: *¿Es posible salvar los corales?*; Alfredo Marcos: *Popper y Kuhn sobre el progreso científico*; José Óscar Hernández Sendín: *Observar las neuronas de animales en movimiento*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. de Caldes, km 3 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España